

新R ① JN 許 V 00001 A

V 強度及び耐食性に関する説明 書

V-4 計算機プログラム（解析
コード）の概要

目次

1. 計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類	1
2. はじめに	3
3. 解析コードの概要	4
3.1 TONBOS	5
3.2 LS-DYNA	6
3.3 MSC NASTRAN	7
3.4 midas iGen	8

新 R 〇 JN 火 G V 00001-2 B

1. 計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類

(1) 建物・構築物

後次回申請以降

新R ㊦ JN 火G V 00001-3 B

(2) 機器・配管系

目録番号	目録名称	機器名称	適用コード名
VI-1-1-1-2-2	固縛対象物の選定	—	TONBOS
V-別添1-4	竜巻防護対策設備の強度計算書	安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット	LS-DYNA
V-別添1-2	竜巻への配慮が必要な施設の強度計算書	安全冷却水B冷却塔	MSC NASTRAN
V-別添1-4	竜巻防護対策設備の強度計算書	安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット	midas iGen

新R ① JN 火G V 00001-4 B

2. はじめに

本資料は、添付書類「V 強度及び腐食性に関する説明書」において使用した解析コードについて説明するものである。

新R ① JN 火G V 00001-5 B

3. 解析コードの概要

新 R ① JN 火 G V 00001-6 B

3.1 TONBOS

項目 \ コード名	TONBOS
開発機関	一般財団法人 電力中央研究所
開発時期	2013年
使用したバージョン	Ver. 3
使用目的	竜巻により発生する飛来物の速度及び飛散距離等の評価
コードの概要	<p>TONBOS (以下「本解析コード」という。)は、一般財団法人電力中央研究所にて開発・保守されているプログラムである。</p> <p>空気中の物体が受ける抗力による運動を計算することで、竜巻による風速場の中での飛来物の飛散軌跡を評価することができる解析コードであり、飛来物の速度、飛散距離等の算出が可能である。</p> <p>仮定する風速場は、鉛直方向には構造が変化しないランキン渦としている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】</p> <p>本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Simiu and Scanlan[*]による解析結果と同じ条件下で、竜巻風速場での飛散軌跡の解析を実施し、概ね一致した結果を得ていることから、本解析コードの妥当性を確認した。 <p>[*]: Simiu, E. and Scanlan, R. H., Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, August 1996.</p> <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、竜巻により発生する飛来物の速度、飛散距離等の評価を目的に開発されたコードであり、使用目的が合致している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより、本解析コードの適正な用途、適用範囲を確認している。 ・評価は妥当性を確認している範囲内で行うようにしている。

新 R ① JN 火 G V 00001-7 B

3.2 LS-DYNA

項目 \ コード名	LS-DYNA
開発機関	Livermore Software Technology Corporation
開発時期	1987年
使用したバージョン	R8.0.0
使用目的	竜巻飛来物衝突に対する構造物の健全性評価
コードの概要	<p>LS-DYNAはLawrence Livermore研究所により開発・公開された陽解法有限要素法DYNA3Dを基に開発された構造解析用汎用コードである。機械・土木・建築その他広範な分野に及ぶ要素群、非線形モデルを多数サポートしており、自動車、航空宇宙、機軸、建築、土木などの様々な分野において多くの利用実績があり、陽的時間積分を用いていることから、衝突問題など短時間の動的現象のシミュレーションに適している。また、大変形の非線形問題への適用が容易である点に特徴がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 開発機関がマニュアルにおいて提示している3次元有限要素法による衝突解析に関する例題解析を実施し、解析結果が提示するマニュアルにより、本解析コードの適正な用途、適用範囲を確認している。 はりの衝撃曲げ、平板の衝撃曲げ、応力波伝播に関する検証解析を実施し、解析結果と理論解が一致することを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 本解析コードは、自動車、航空宇宙、機械、建築、土木などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 開発機関が提示するマニュアルにより、本解析コードの適正な用途、適用範囲を確認している。 設工認申請で行う3次元有限要素（はり要素、シェル要素、ソリッド要素）による動的解析（衝突解析）の用途、適用範囲が、上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。

新R① JN 安ユ V 00001-8 B

3.3 MSC NASTRAN

項目 \ コード名	MSC NASTRAN
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2008. 0. 4
使用目的	3次元有限要素法による応力解析
コードの概要	<ul style="list-style-type: none"> MSC NASTRAN（以下、「本解析コード」という。）は、航空機の機体強度解析を目的として開発された有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。 適用モデル（主にはり要素、シェル要素、ソリッド要素）に対して、静的解析（線形、非線形）、動的解析（過渡応答解析、周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。 数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木など様々な分野の構造解析に使用されている。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、安全冷却水B冷却塔の3次元有限要素法による応力解析に使用している。</p> <p>【検証(Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 構造力学分野における一般的知見により解を求めることが出来る体系について、本解析コードを用いた3次元有限要素法による応力解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解と一致することを確認している。 本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 日本原子力発電株式会社「東海第2発電所」において、使用済燃料乾式貯蔵建屋の静的応力解析及び動的応力解析に本解析コードが使用された実績がある。 検証の体系と今回申請で使用する体系が同等であることから、検証結果をもって解析機能の妥当性も確認できる。 今回の申請において使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。 本解析コードの適用制限として使用要素数があるが、使用した要素数は適用制限以下であり、本申請における使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

新R①JN安ユ V 00001-9 B

3.4 midas iGen

コード名 項目	midas iGen
開発機関	MIDAS IT
開発時期	1990年代前半
使用したバージョン	Ver. 845
使用目的	静的解析
コードの概要	<ul style="list-style-type: none"> ・ midas iGen (以下「本解析コード」という。)は、建築分野に特化した要素群及び材料非線形モデルを数多くサポートしている構造解析用の汎用計算機プログラムである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネットの静的解析に使用している。</p> <p>【検証(Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ フレームモデルを対象に、本解析コードによる解析結果と、別計算機コード「汎用計算機コード (TDAPⅢ) による解析結果を比較し、両者の解析結果が概ね一致することを確認している。 ・ 本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 日本原電株式会社「東海第2発電所」において、原子炉建屋の静的解析に本解析コードが使用された実績がある。 ・ 検証の体系と今回申請で使用する体系が同等であることから、検証結果をもって解析機能の妥当性も確認できる。 ・ 今回の申請において使用するバージョンは、他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが、バージョンの変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。 ・ 今回申請で行う使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

V－別添1 竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書

V－別添 1－1 竜巻への配慮が
必要な施設の強度計算の方針

目次

1. 概要	1
2. 強度評価の基本方針	1
2.1 強度評価の対象施設	1
2.2 評価方針	2
2.2.1 評価の分類	2
3. 構造強度設計	4
3.1 構造強度の設計方針	4
3.2 機能維持の方針	5
4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界	10
4.1 荷重及び荷重の組合せ	10
4.2 許容限界	16
4.2.1 建屋・構築物	16
4.2.2 機器・配管系	16
5. 強度評価方法	21
5.1 建屋・構築物	21
5.2 機器・配管系に関する評価式	22
5.2.1 安全冷却水B冷却塔	22
5.2.2 配管	30
6. 適用規格	34

1. 概要

本資料は、「再処理施設の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という。）第八条に適合し、添付書類「VI-1-1-1 再処理施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書」のうち「VI-1-1-1-2 竜巻への配慮に関する説明書」の「VI-1-1-1-2-3 評価対象施設の設計方針」に基づき、評価対象施設が、設計竜巻に対して要求される強度を有することを確認するための強度評価方針について説明するものである。

なお、竜巻防護対策設備の具体的な計算の方法は、添付書類「V-別添1-3 竜巻防護対策設備の強度計算の方針」に示し、評価結果は添付書類「V-別添1-4 竜巻防護対策設備の強度計算書」に示す。

2. 強度評価の基本方針

強度評価は、「2.1 強度評価の対象施設」に示す評価対象施設について、「4.1 荷重及び荷重の組合せ」で示す設計荷重（竜巻）が「4.2 許容限界」で示す許容限界内にあることを「5. 強度評価方法」に示す計算方法を使用し、「6. 適用規格」に示す適用規格を用いて確認する。

2.1 強度評価の対象施設

添付書類「VI-1-1-1-2-3 評価対象施設の設計方針」の「3. 要求機能及び性能目標」にて構造強度上の性能目標を設定している評価対象施設を強度評価の対象とする。強度評価を行うにあたり、評価対象施設を以下のとおり分類することとし、第2.1-1表に示す。

(1) 屋外の竜巻防護対象施設

設計荷重（竜巻）に対し構造強度を維持する必要がある屋外の竜巻防護対象施設とする。

第2.1-1表 強度評価における施設分類

強度評価における分類	施設名称
(1) 屋外の竜巻防護対象施設	<ul style="list-style-type: none"> ・安全冷却水B冷却塔 ・配管(安全冷却水B冷却塔～前処理建屋)

2.2 評価方針

評価対象施設は、添付書類「VI-1-1-1-2-3 評価対象施設の設計方針」の「3. 要求機能及び性能目標」にて設定している構造強度上の性能目標を達成するため、「2.1 強度評価の対象施設」で分類した施設ごとに、竜巻に対する強度評価を実施する。強度評価の方針は、それぞれ「2.2.1(1) 衝突評価」の方針及び「2.2.1(2) 構造強度評価」の方針に分類でき、評価対象施設はこれらの評価を実施する。

2.2.1 評価の分類

(1) 衝突評価

後次回申請以降

(2) 構造強度評価

構造強度評価は、竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重、設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重（常時作用する荷重、運転時荷重、積雪荷重）を適切に組み合わせた荷重（以下「設計荷重（竜巻）」という。）により生じる応力等に対し、評価対象施設及びその支持構造物が、当該施設の機能を維持可能な構造強度を有することを確認する。

a. 建屋・構造物

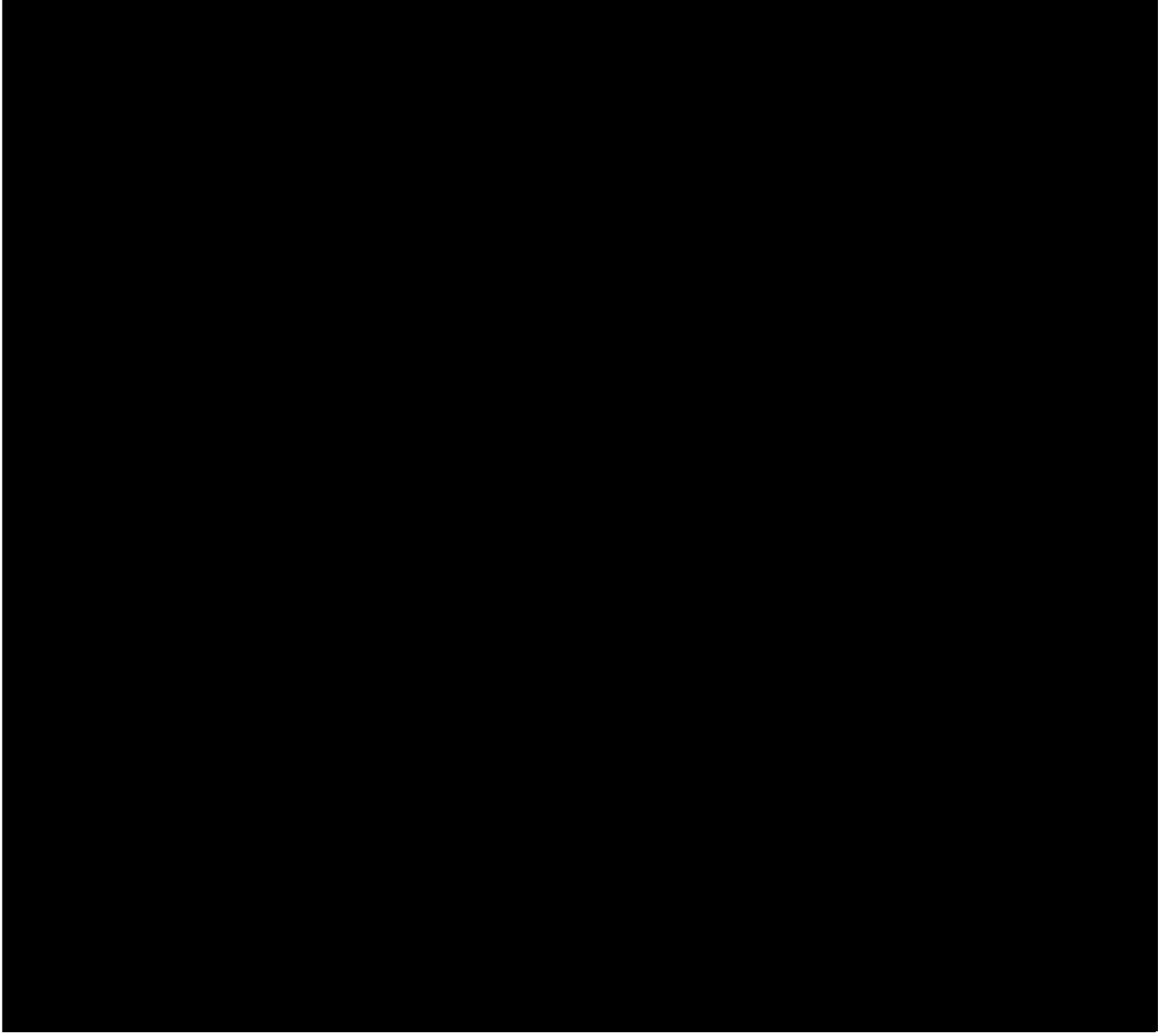
後次回申請以降

b. 機器・配管系

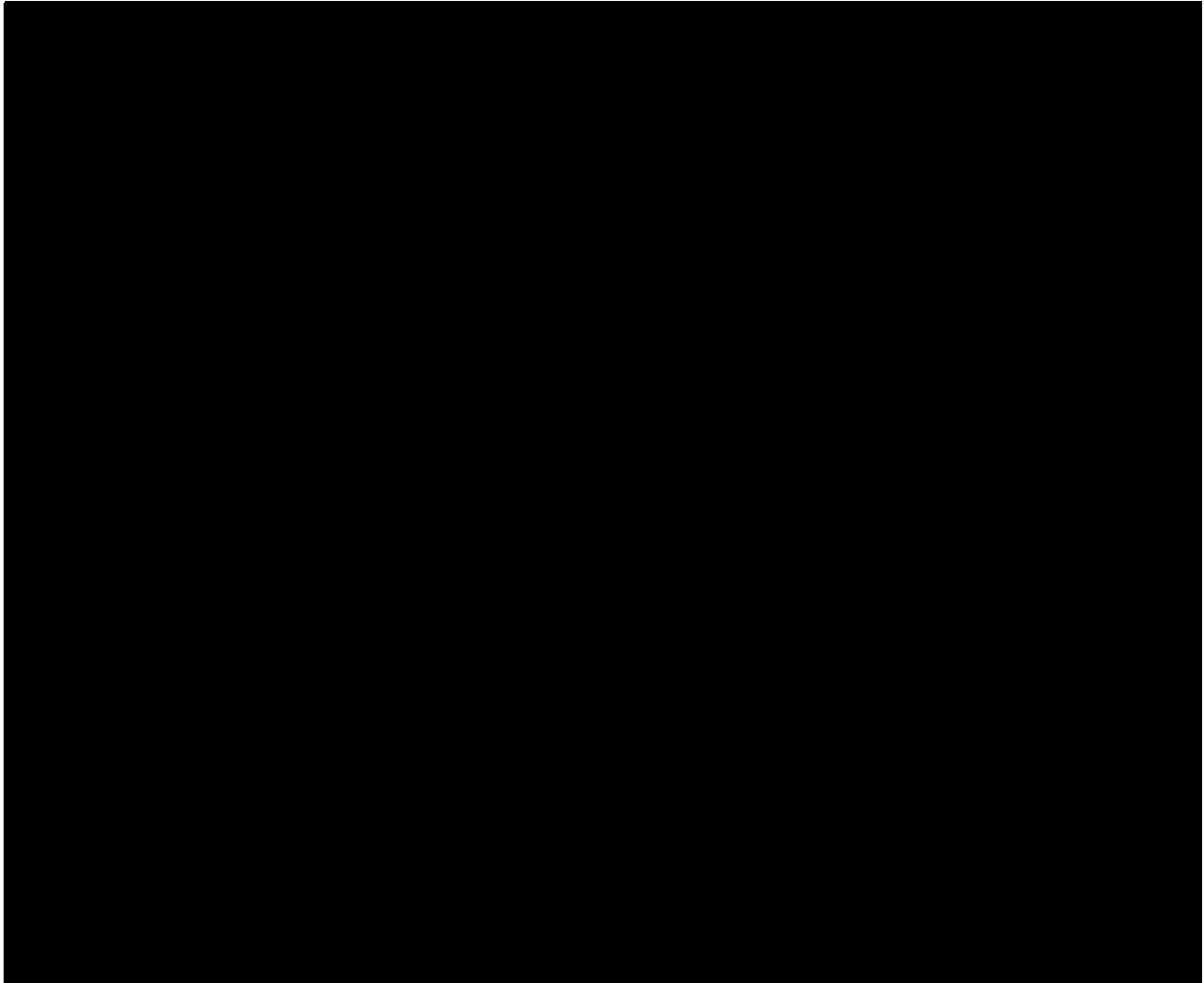
(a) 安全冷却水B冷却塔

(b) 配管（安全冷却水B冷却塔～前処理建屋）

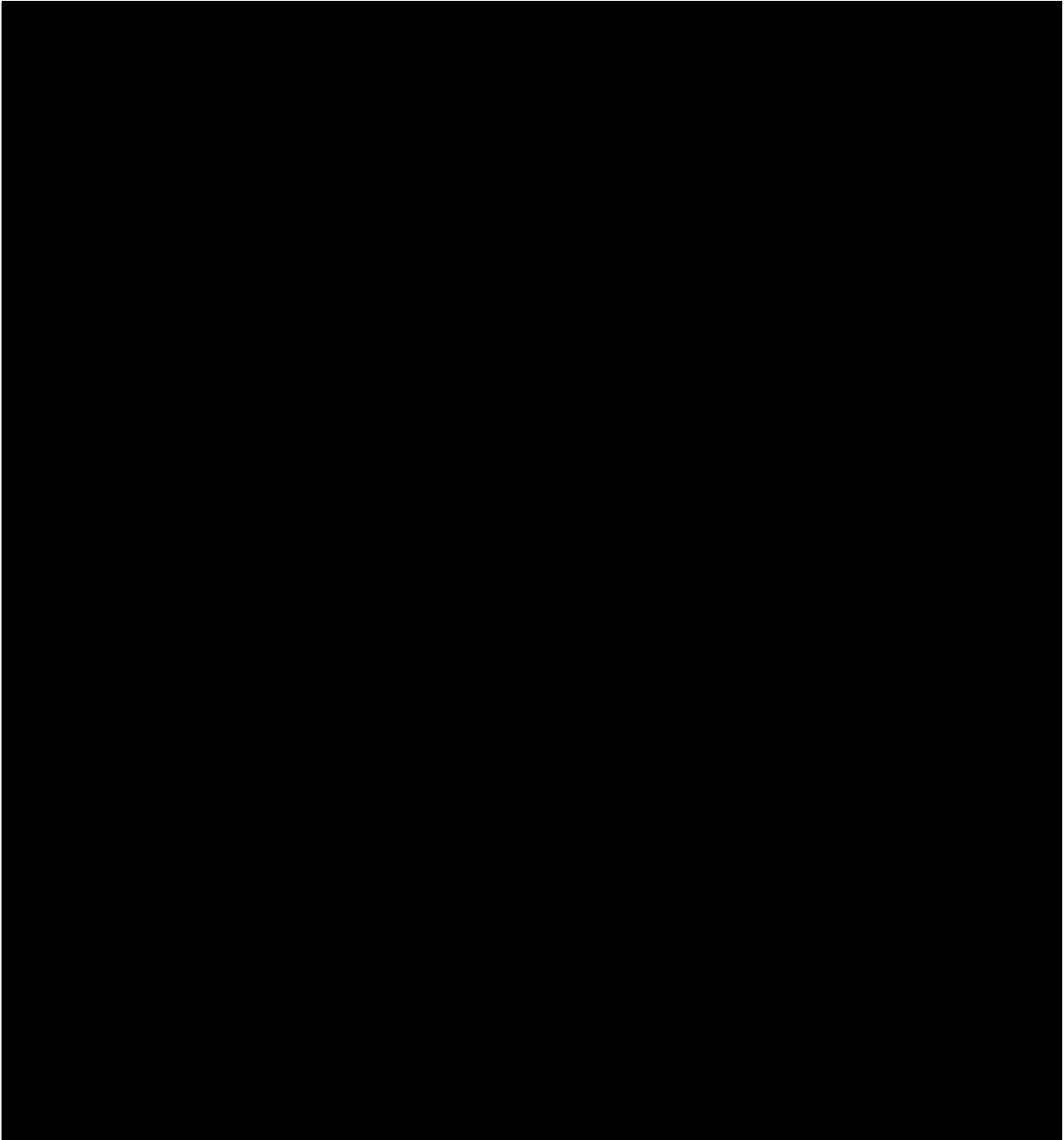
新 R ① JN 火 G V 00008 C



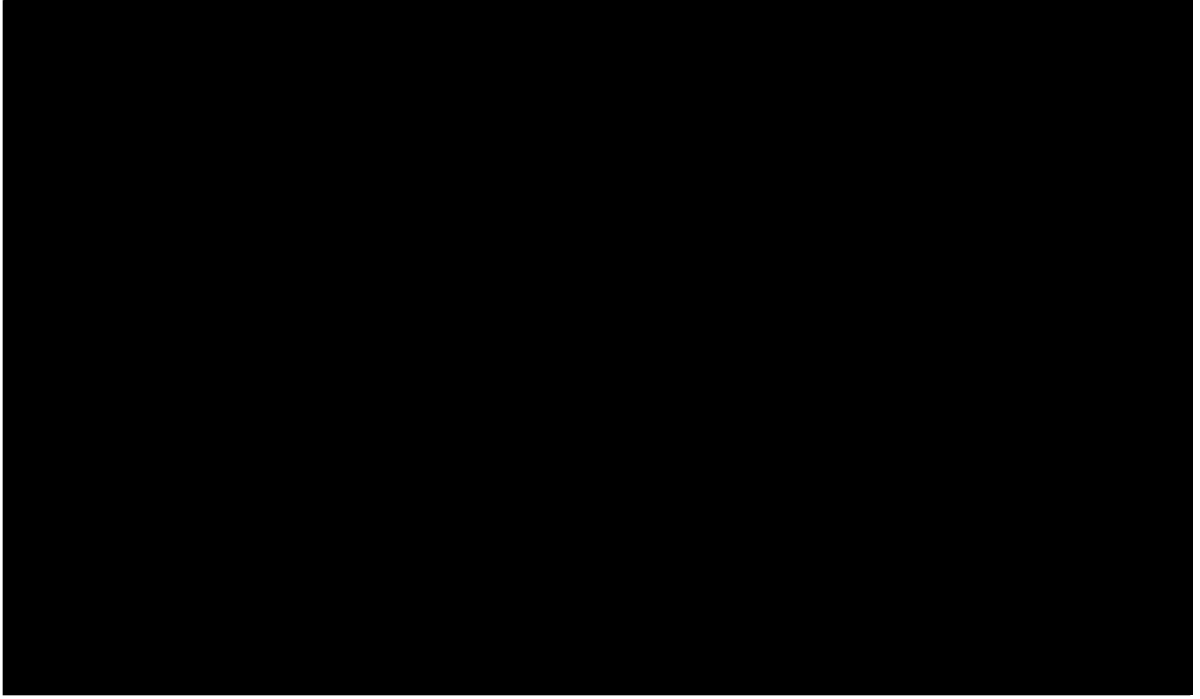
新 R ① JN 火 G V 00009 C



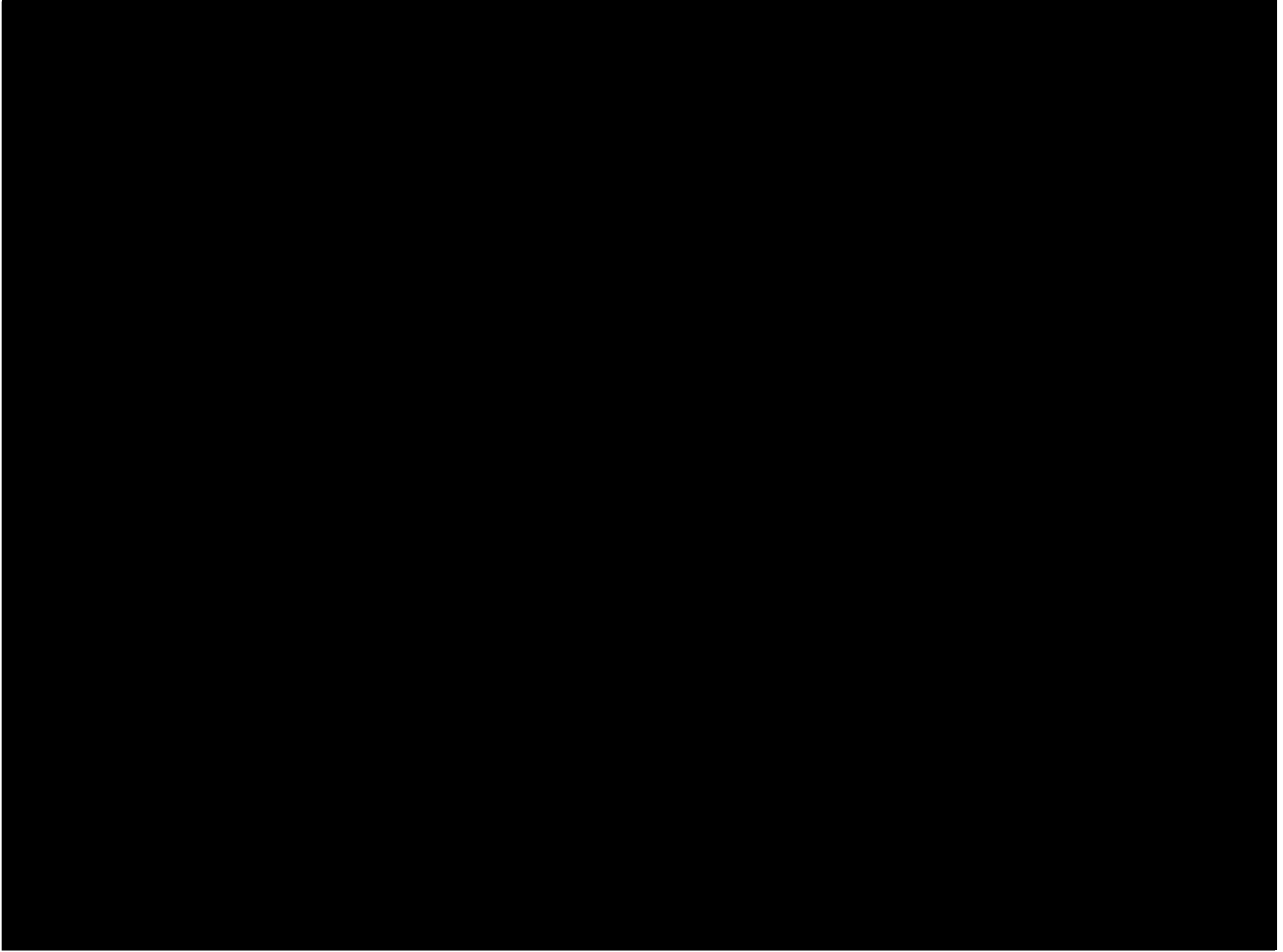
新R ㊦ JN 火G V 00010 C



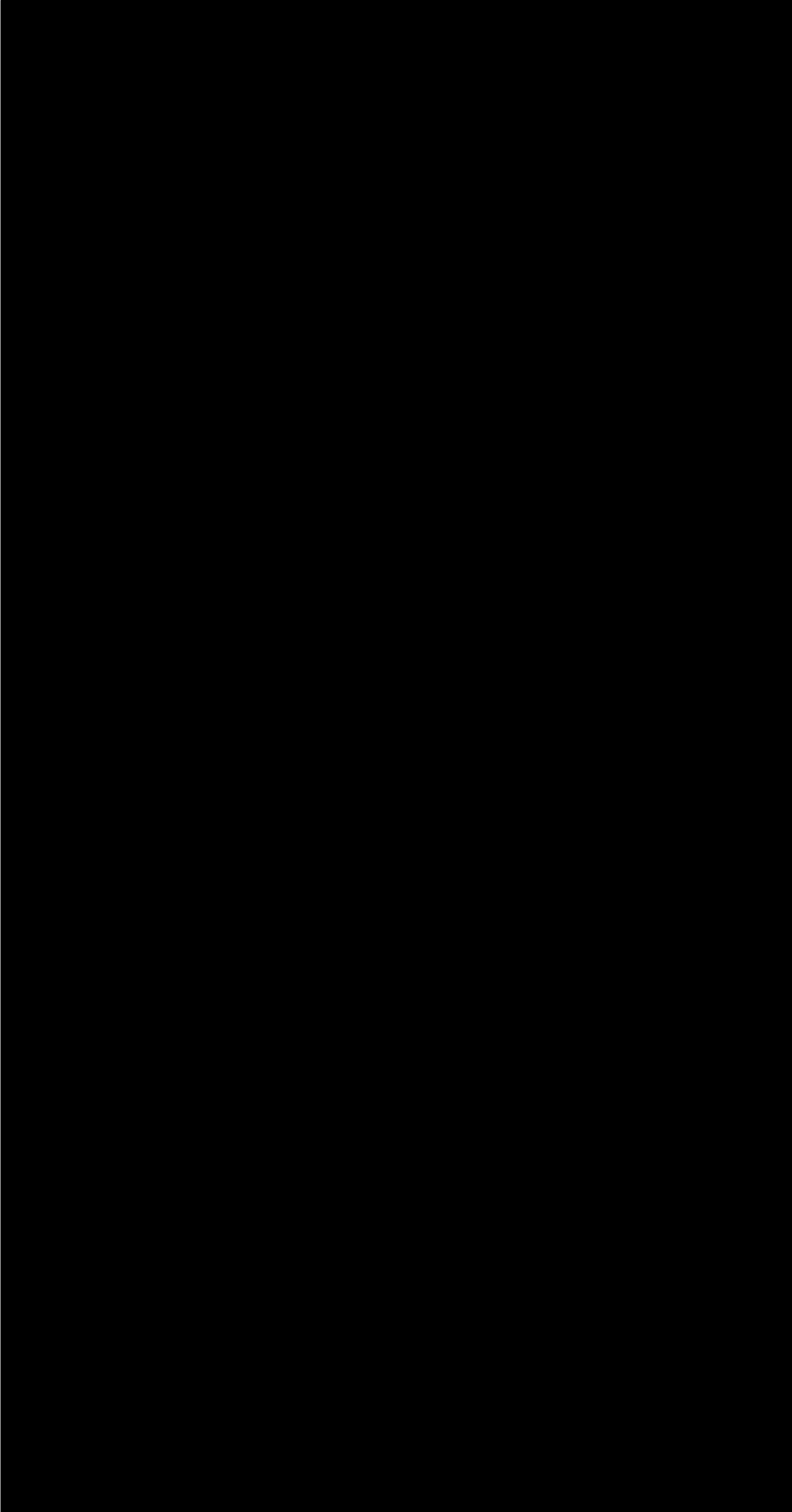
新R ① JN 火G V 00011 C



新R ① JN 火G V 00012 C

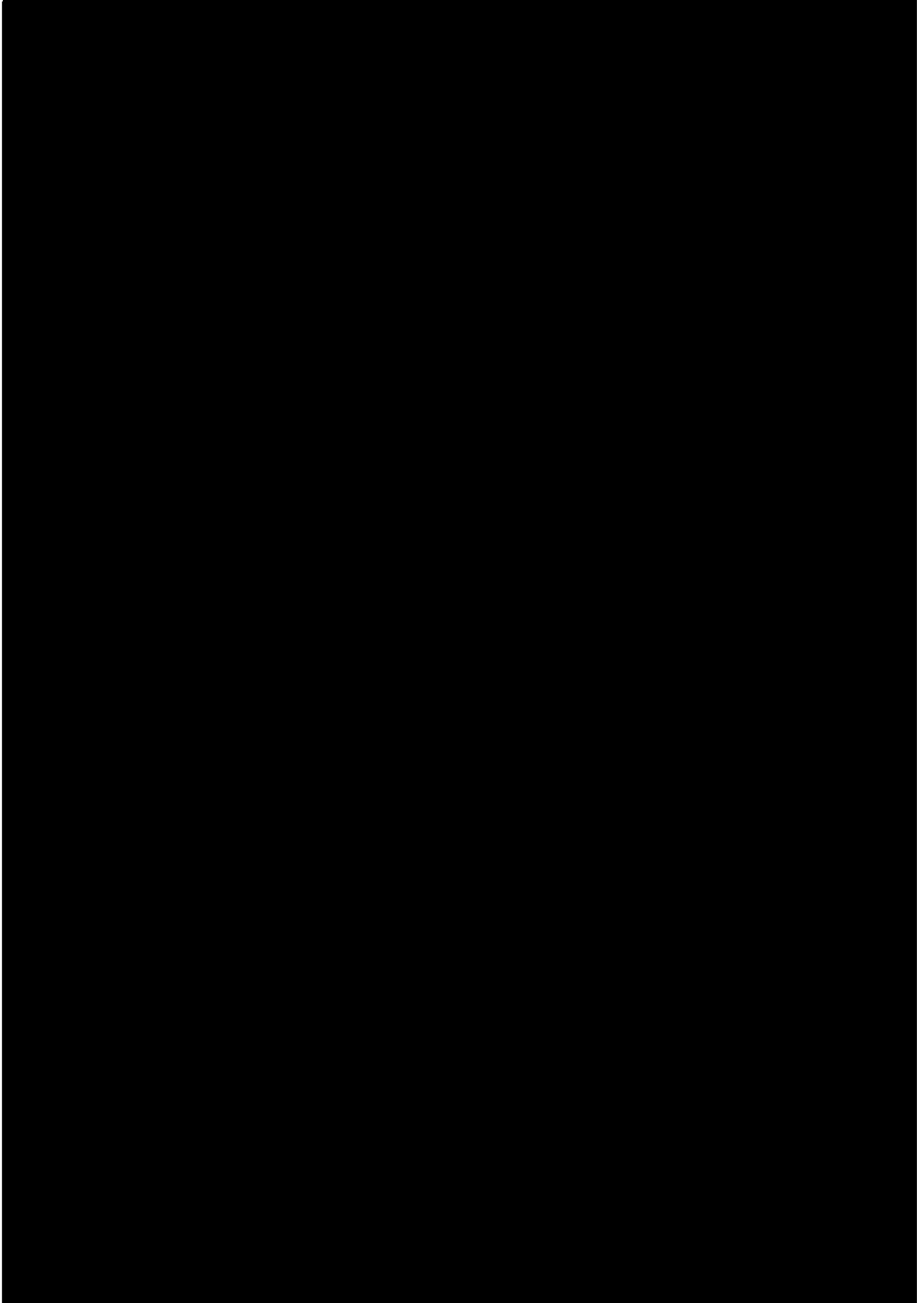


新 R ① JN 火 G V 00013 C



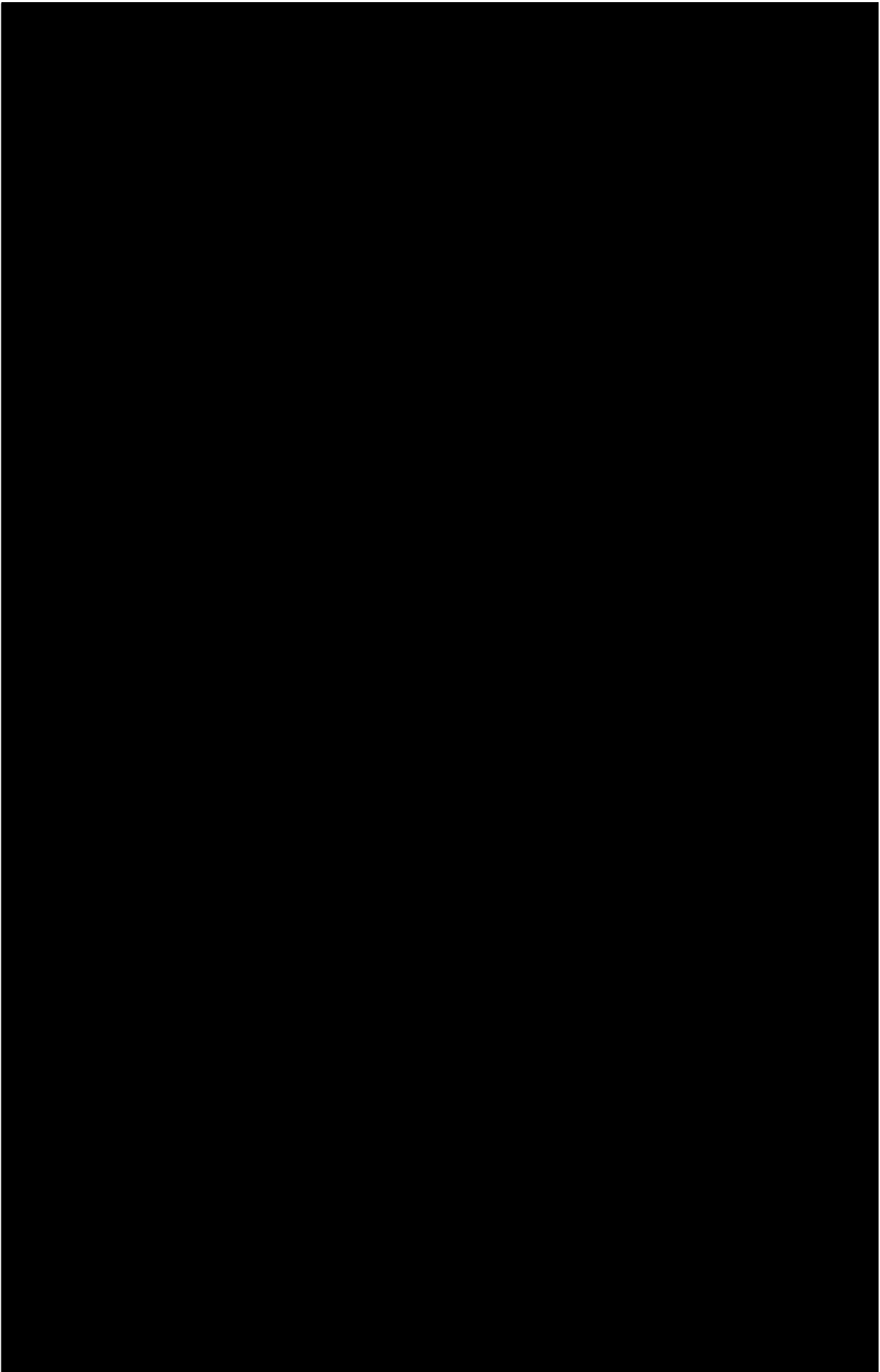


新R ① JN 火G V 00014 C

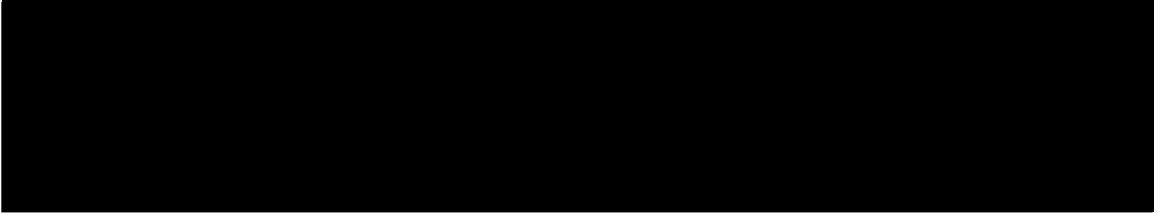




新R ① JN 火G V 00015 C

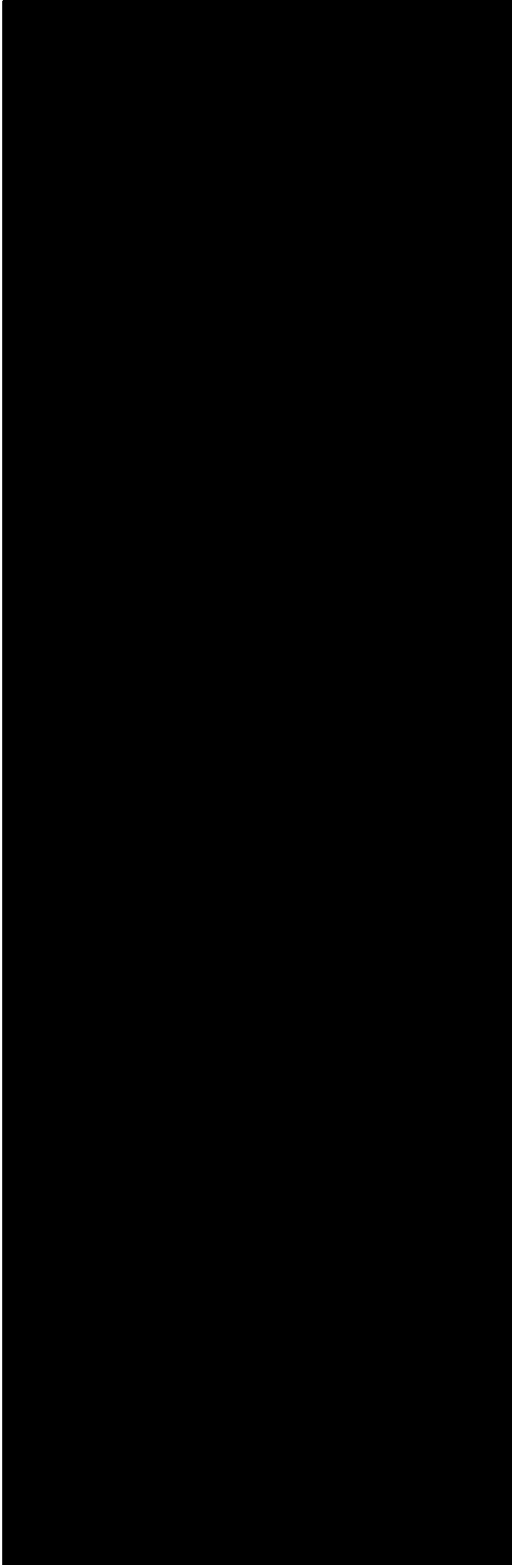


新R ① JN 火G V 00016 C

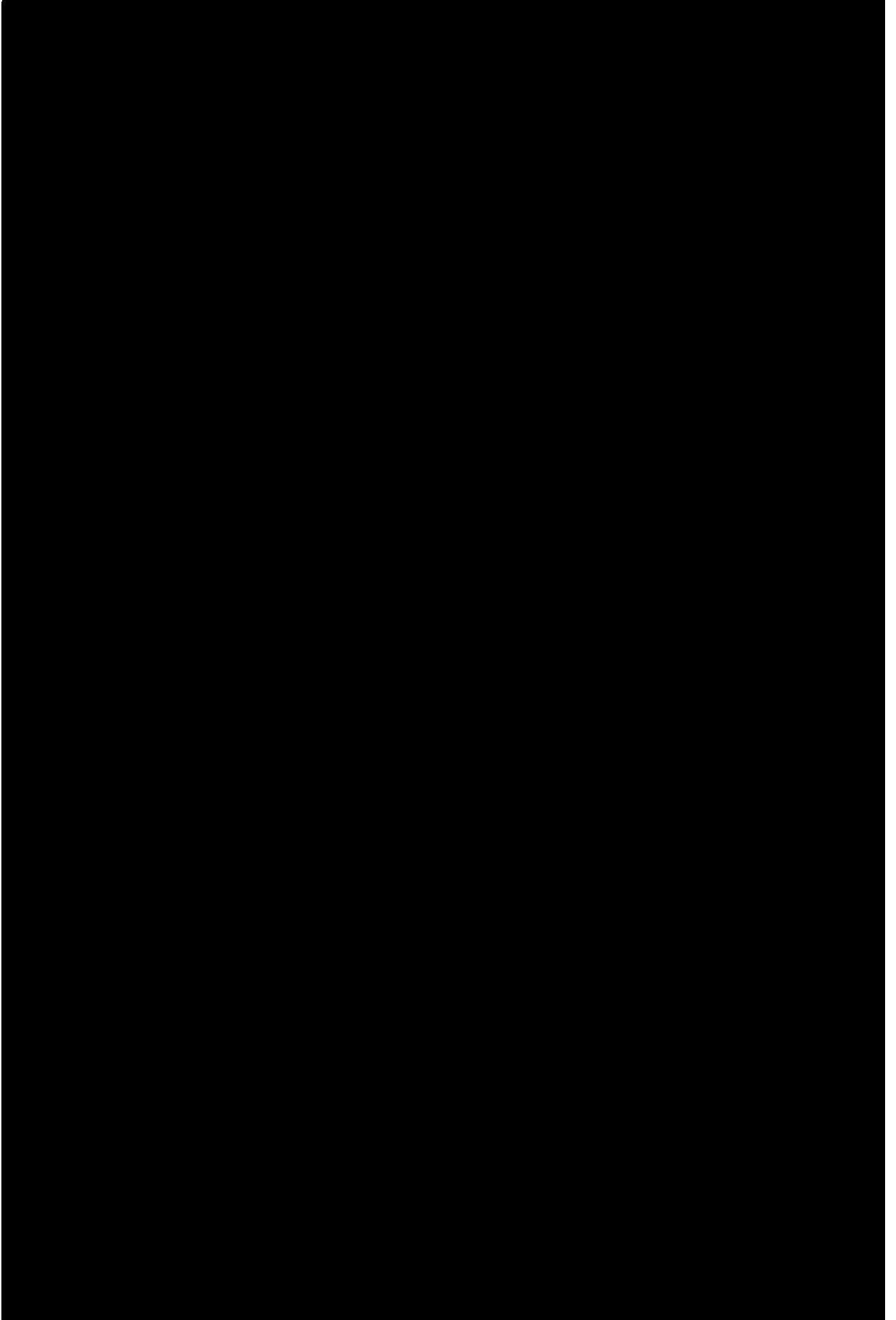




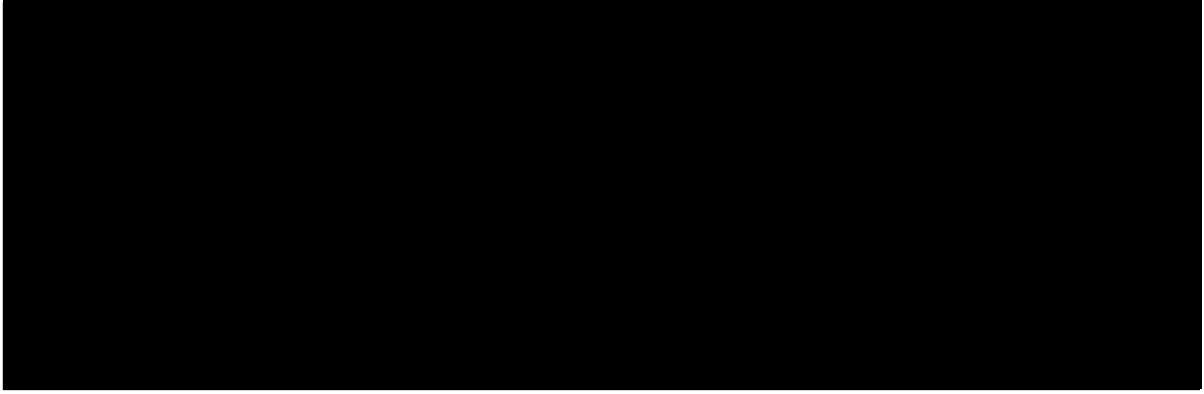
新R ① JN 火 G V 00017 C



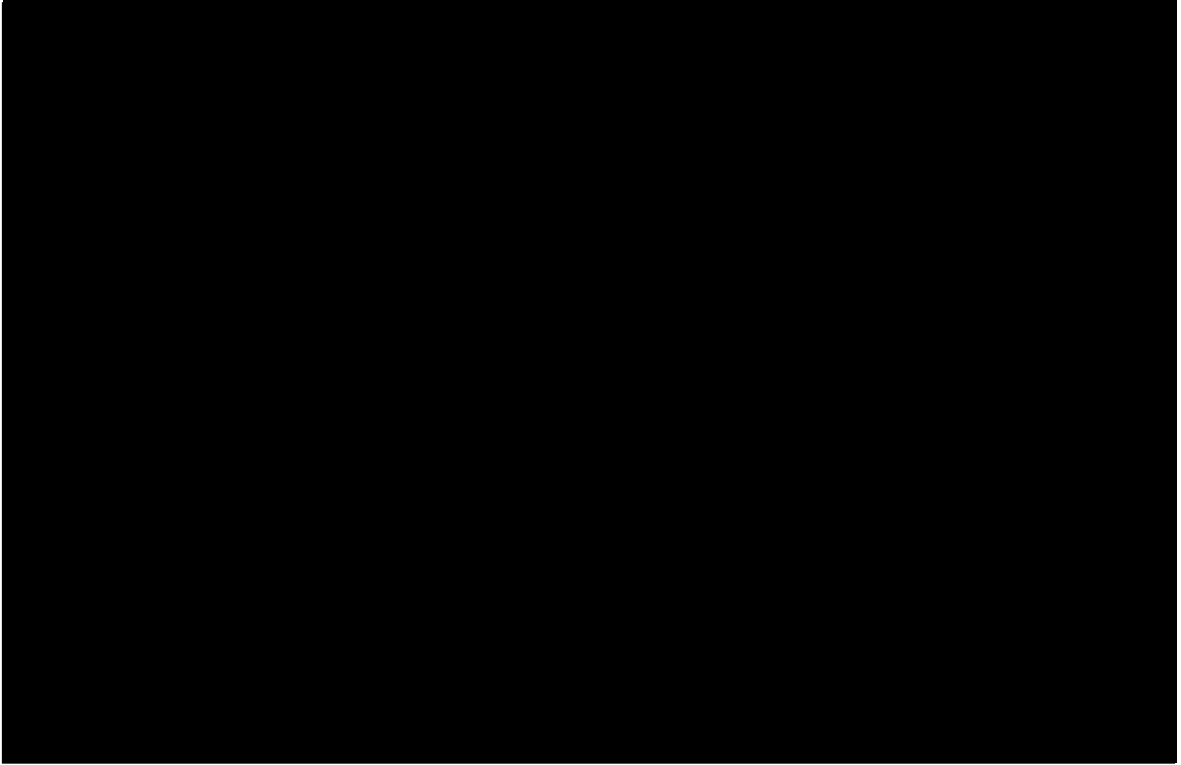
新R ① JN 火G V 00018 C



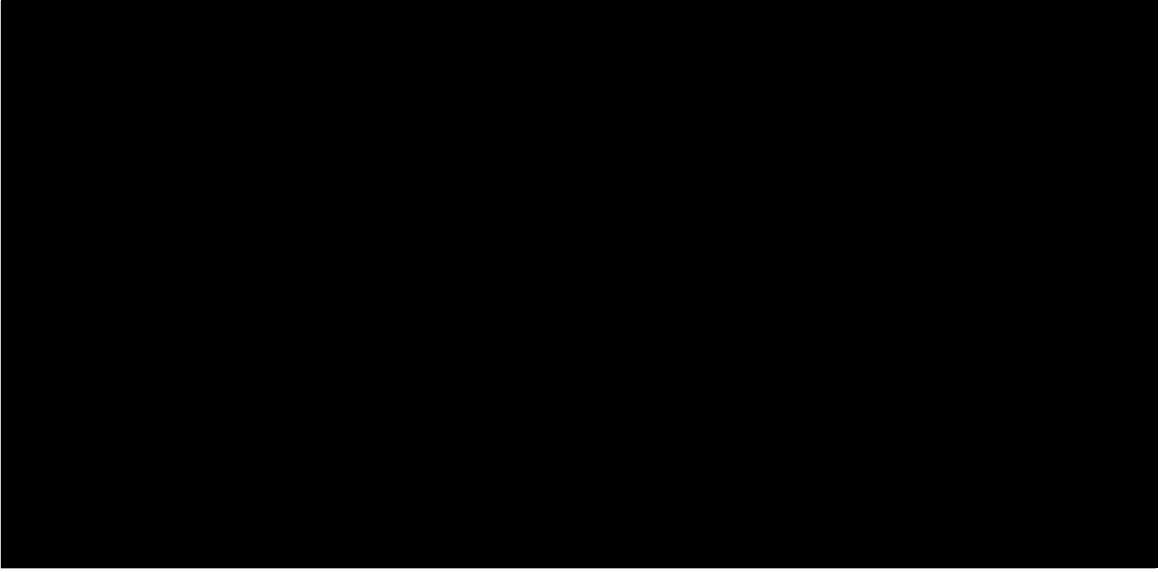
新R ① JN 火G V 00019 C



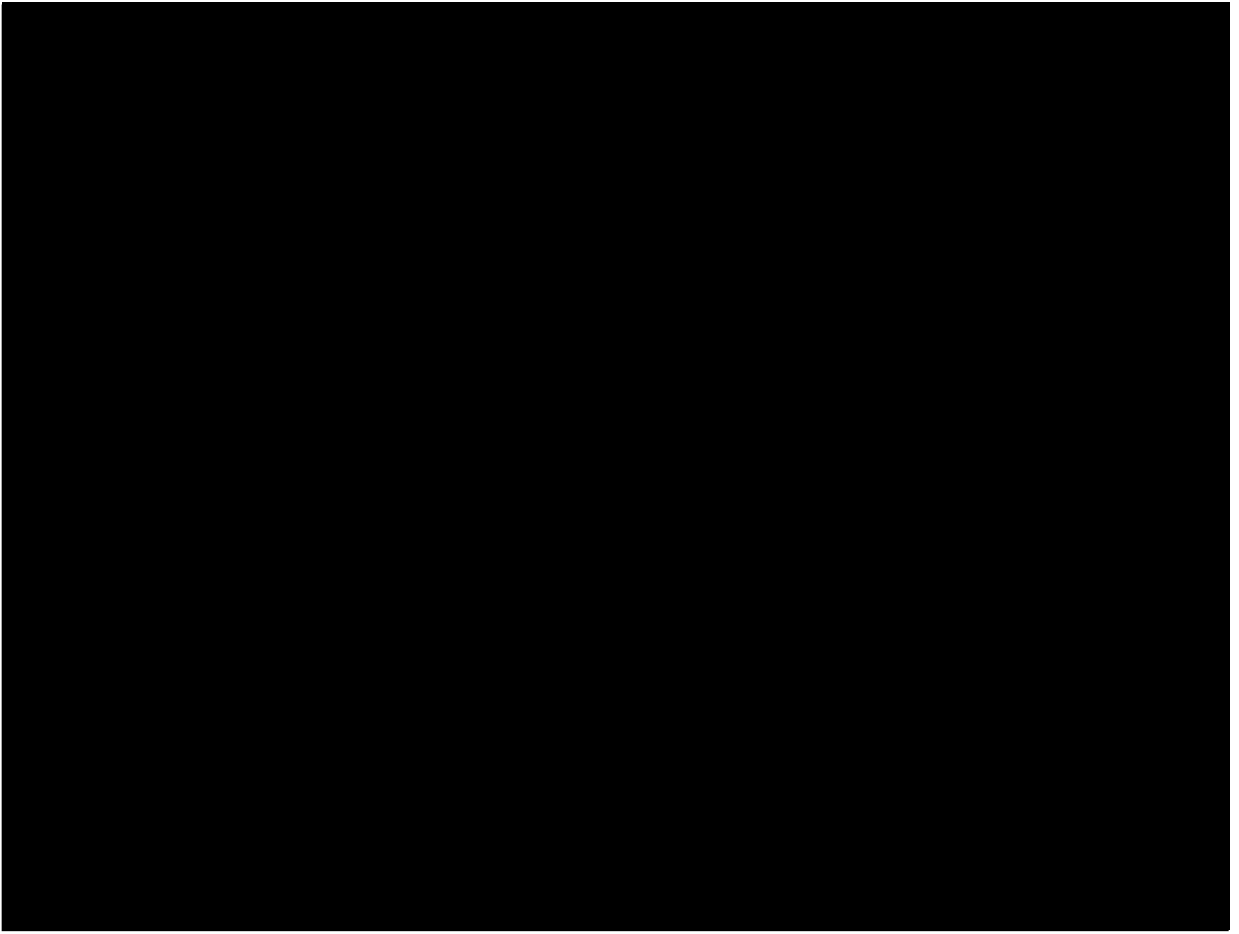
新R ① JN 火G V 00020 C



新R ① JN 火G V 00021 C



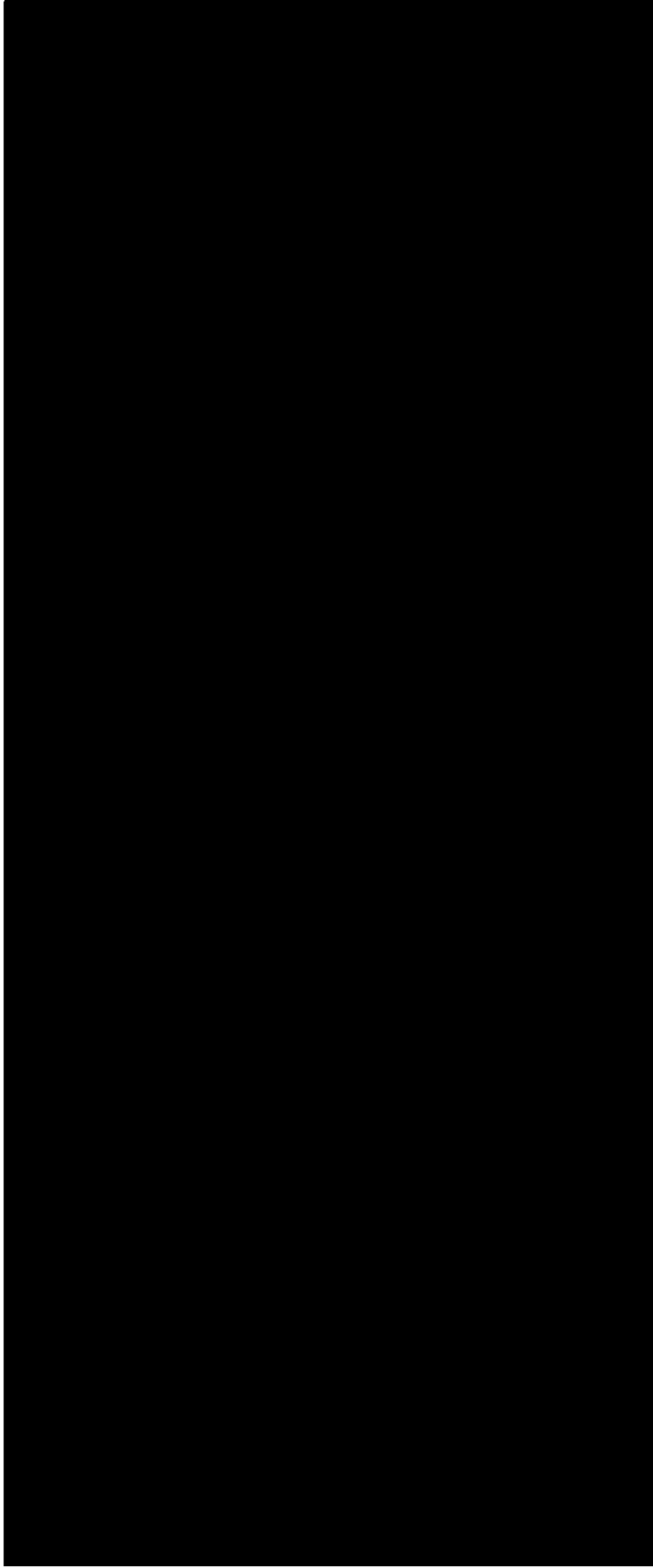
新R ① JN 火G V 00022 C



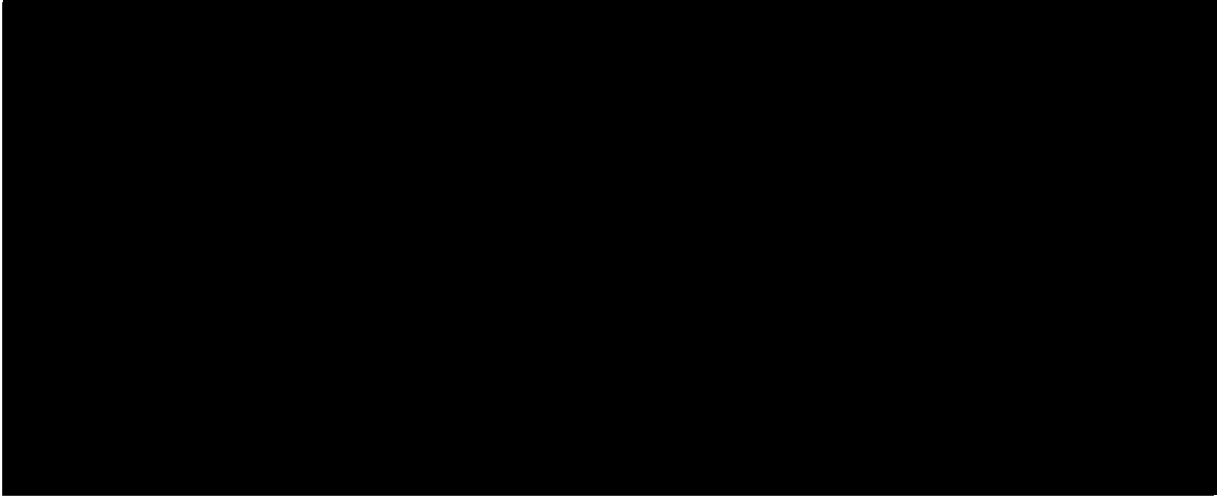
新R ① JN 火 G V 00023 C



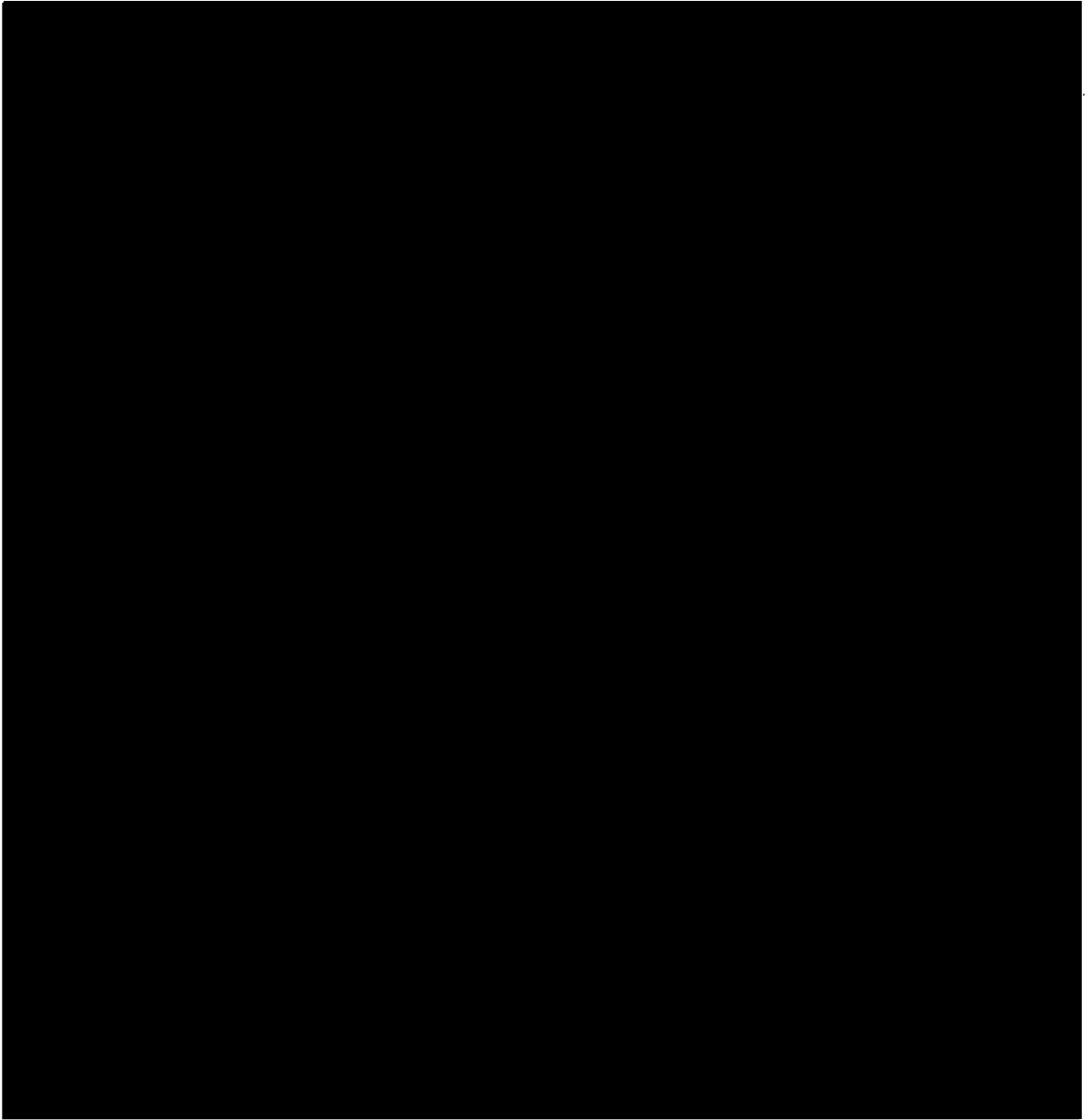
新 R ① JN 火 G V 00024 C



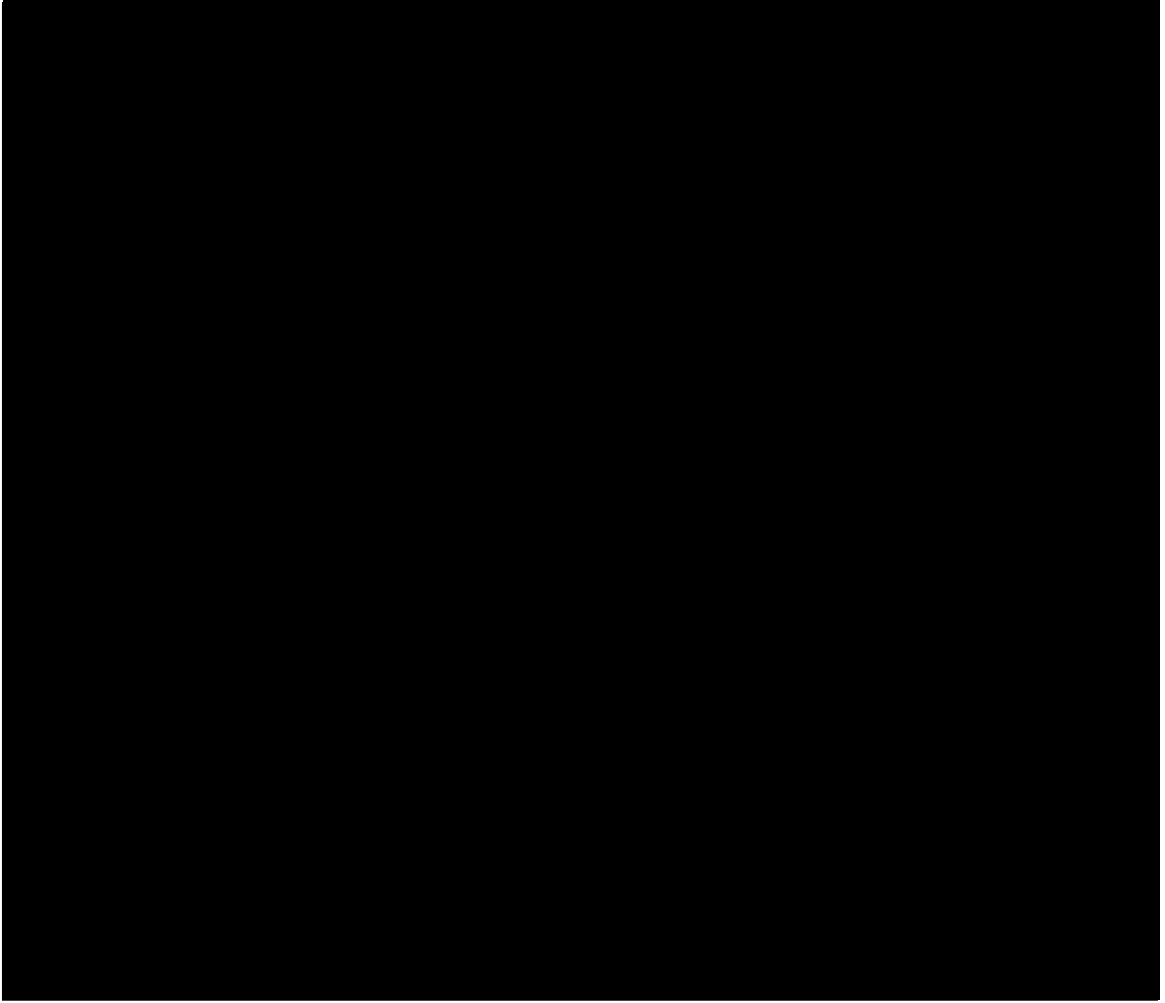
新 R ① JN 火 G V 00025 C



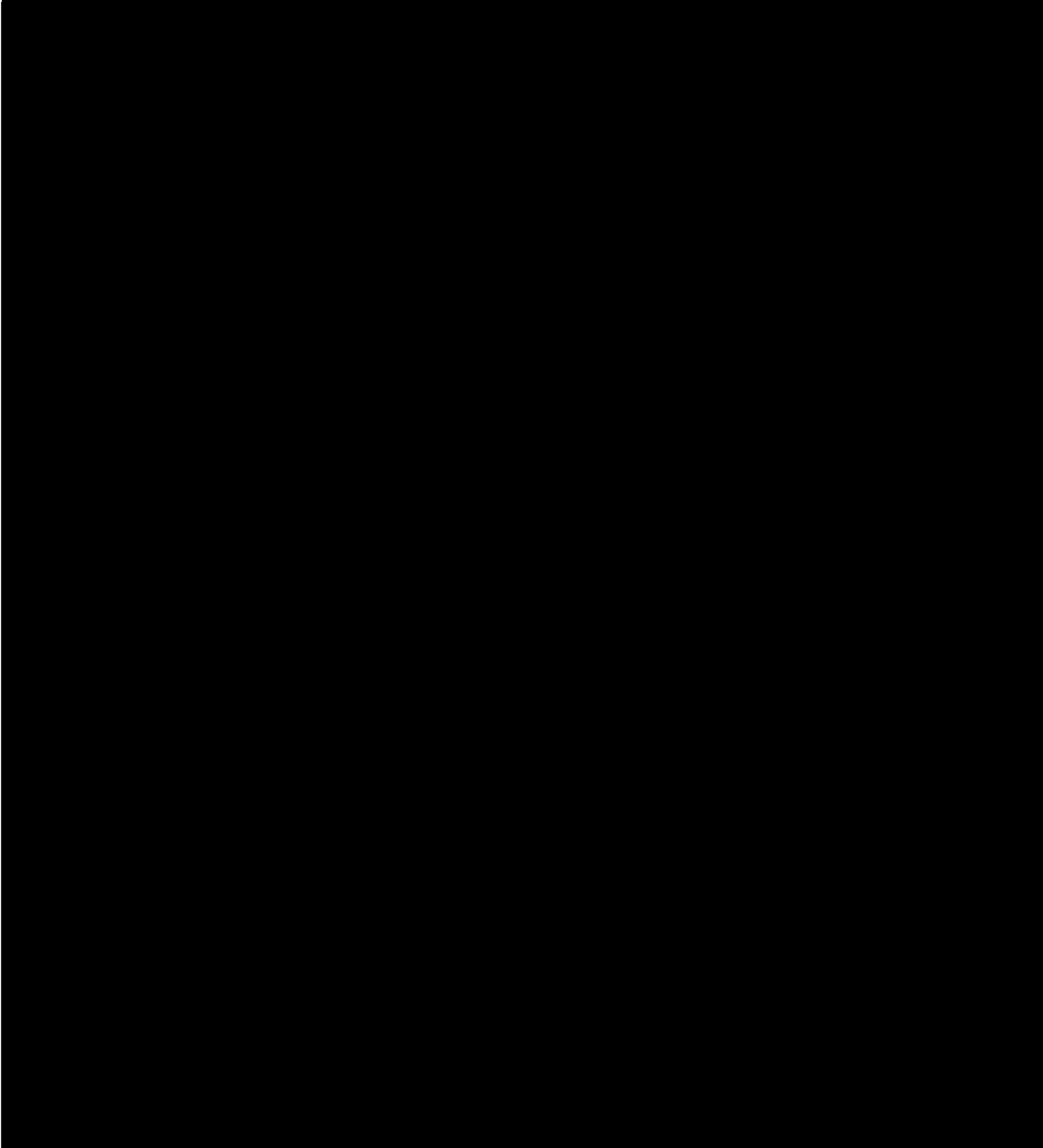
新 R ① JN 火 G V 00026 C



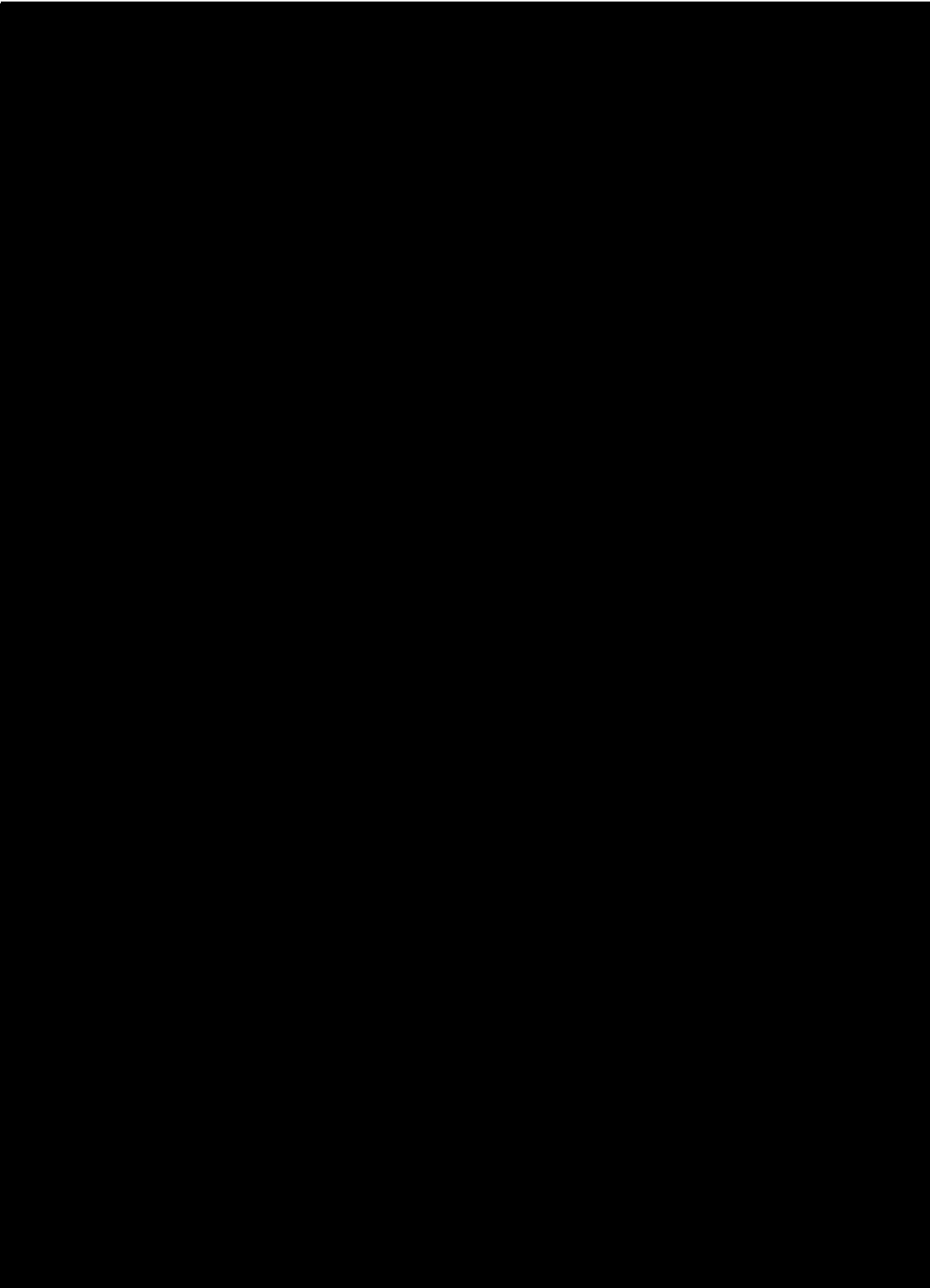
新 R ① JN 火 G V 00027 C



新 R ① JN 火 G V 00028 C

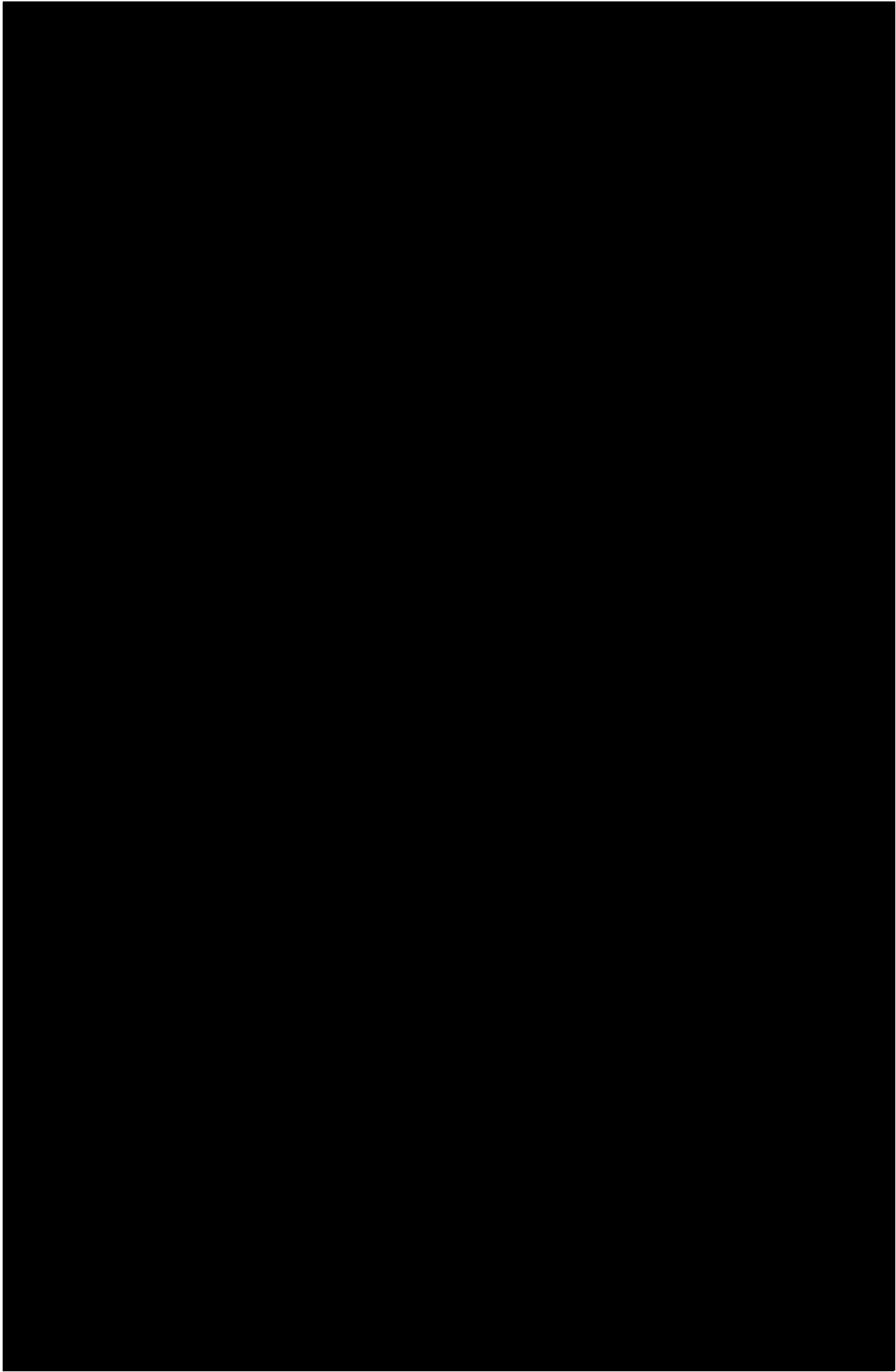


新 R ① JN 火 G V 00029 C



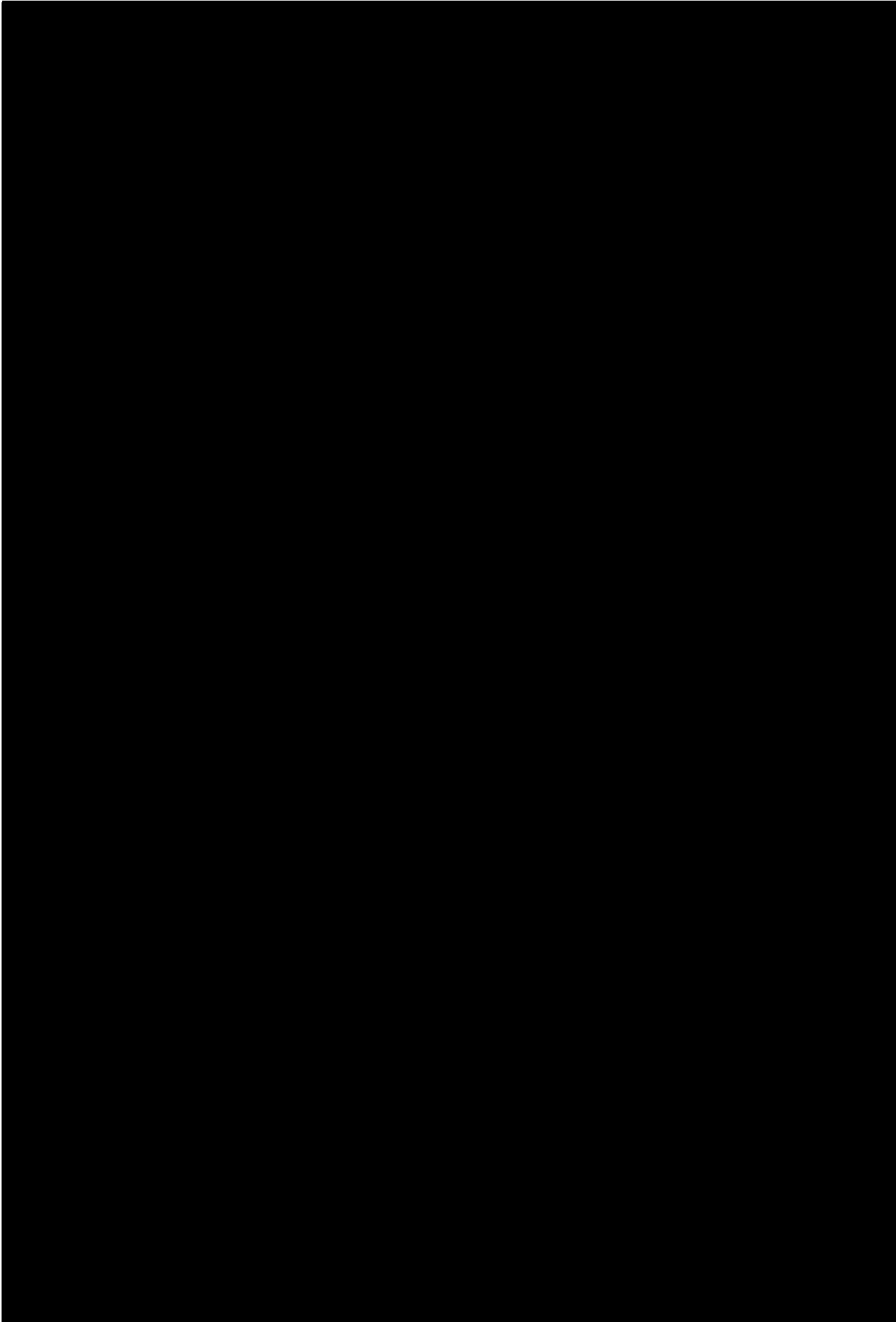


新 R ① JN 火 G V 00030 C

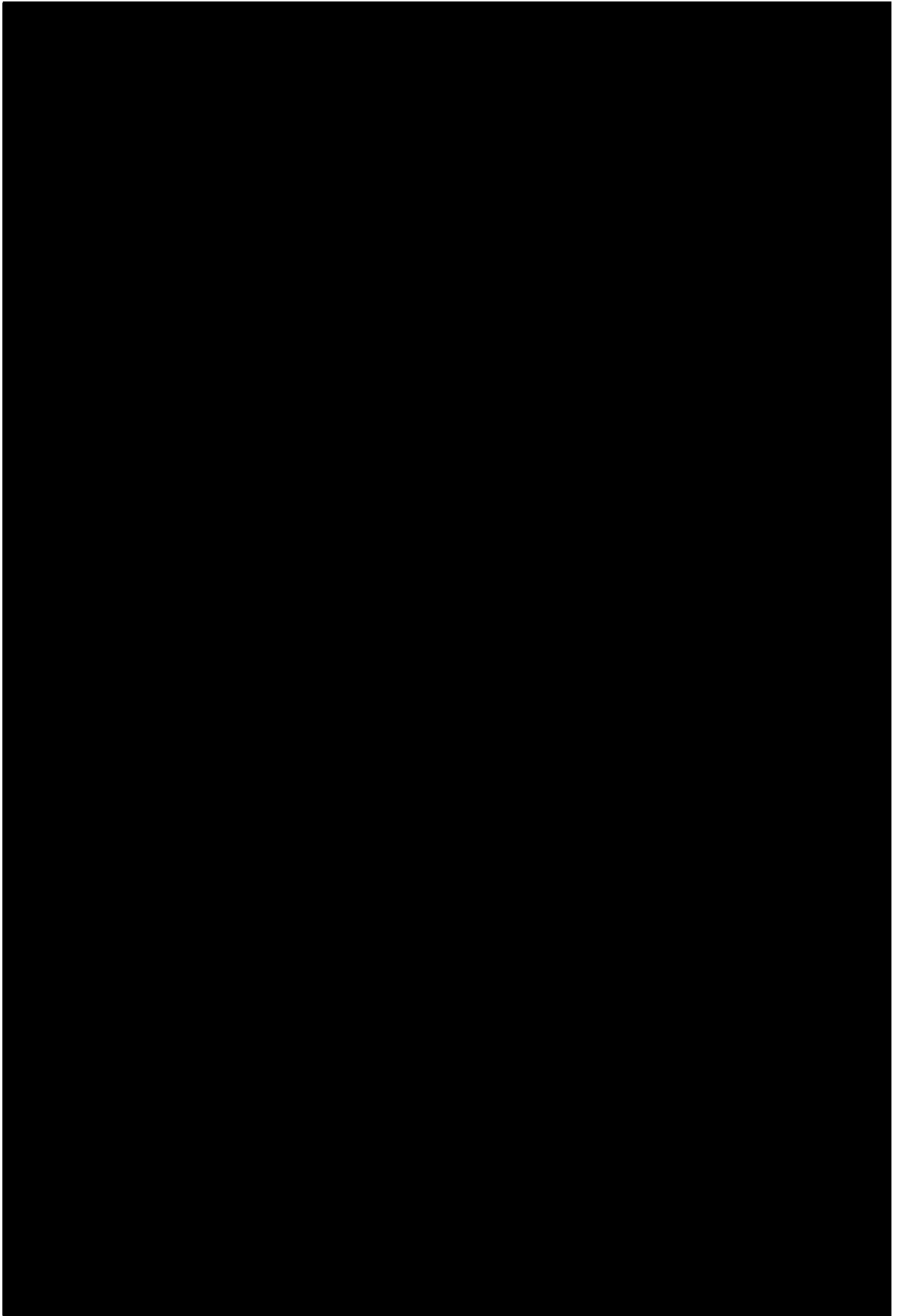




新R ① JN 火 G V 00031 C



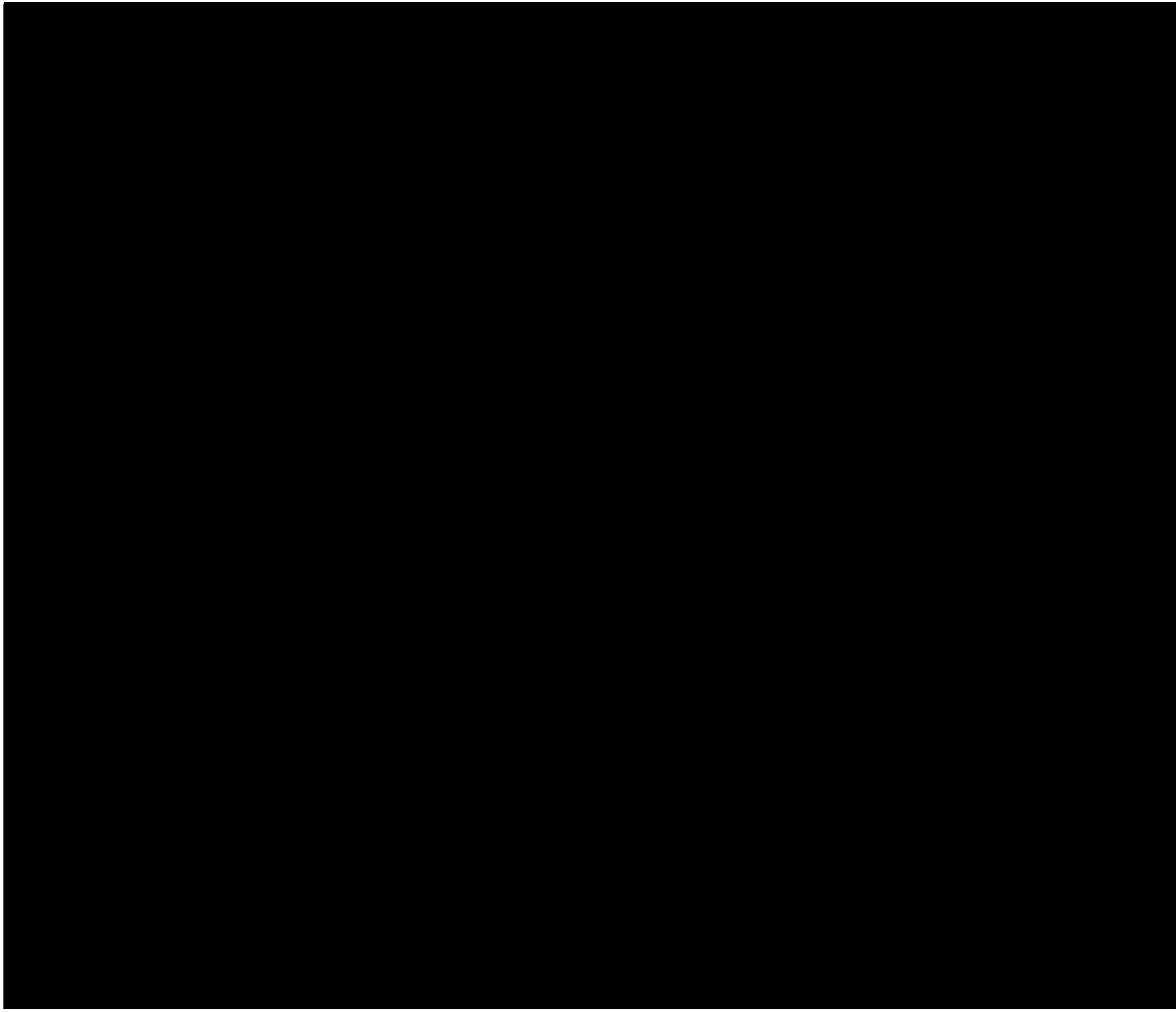
新 R ① JN 火 G-V 00032 C



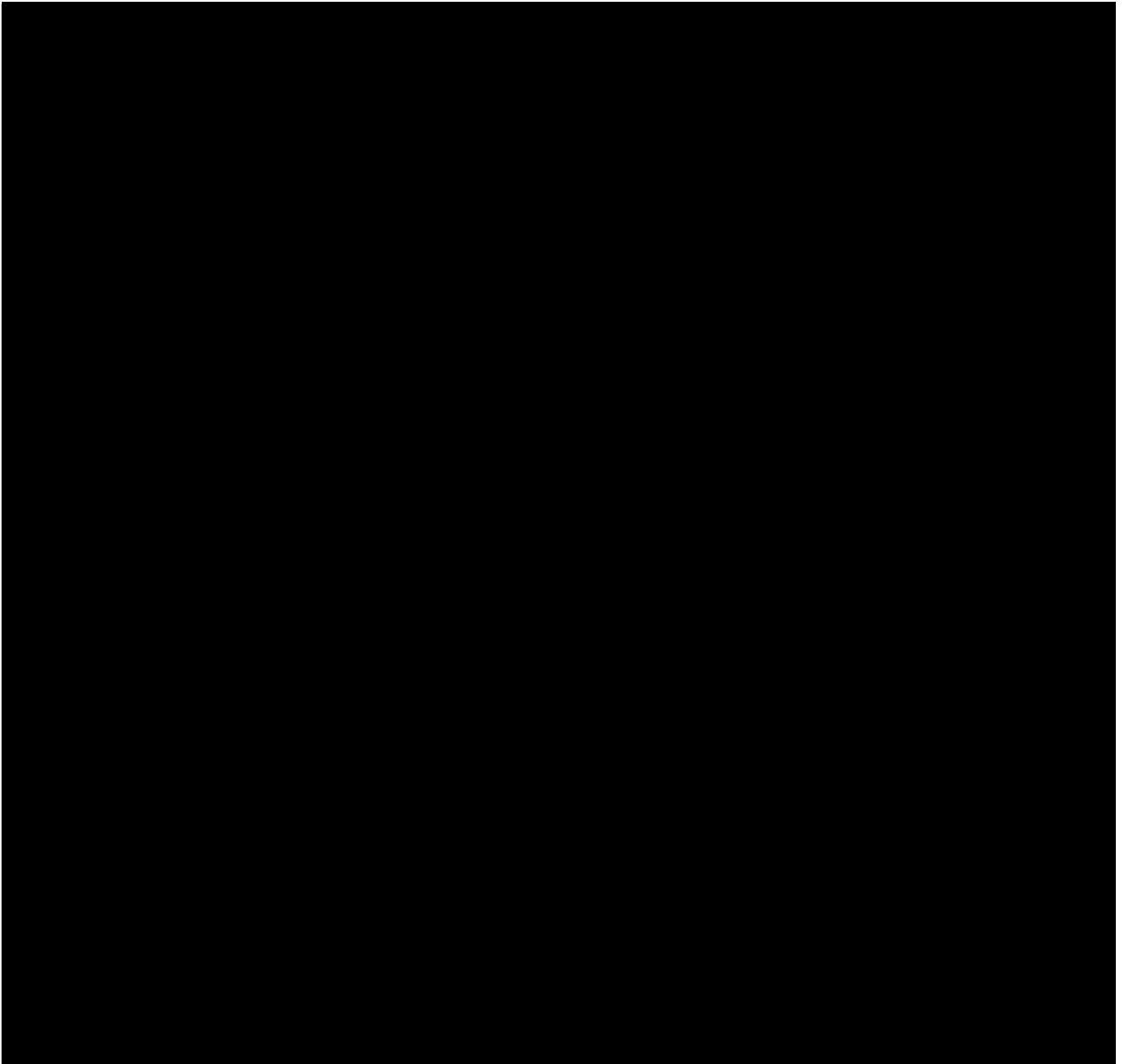
新R ① JN 火G V 00033 C



新R ① JN 火G V 00034 C



新 R ① JN 火 G V 00035 C

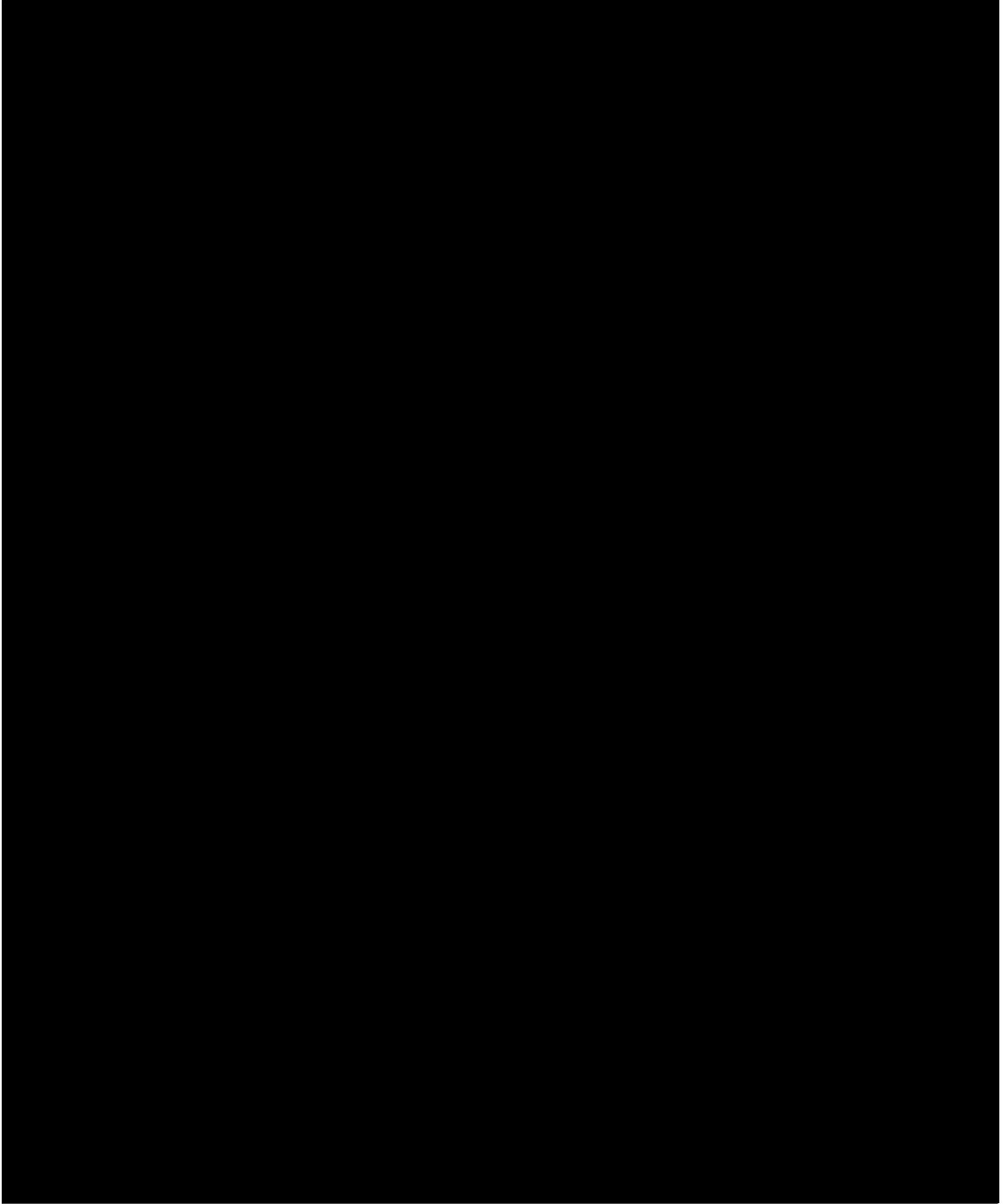


新 R ① JN 火 G V 00036 C





新 R ① JN 火 G V 00037 C



6. 適用規格

添付書類「VI-1-1-1-2-1 竜巻への配慮に関する基本方針」の「2.4 適用規格」においては、竜巻の影響を考慮する施設の設計に係る適用規格を示している。

これらのうち、竜巻防護対策設備及び屋外重大事故等対処設備の固縛装置を除く施設の強度設計に用いる規格、基準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法・同施行令・同告示
- ・ 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005/2007 ((社) 日本機械学会)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987 ((社) 日本電気協会)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601-2008 ((社) 日本電気協会)
- ・ AN INTERNATIONAL CODE 2010 ASME Boiler and Pressure Vessel Code 2010 Edition July 1, 2010 II PartD Properties (Metric) MATERIALS ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on Materials
- ・ 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド (原規技発第 1409172 号)
- ・ 日本産業規格 (JIS)

V-別添 1-2 竜巻への配慮が
必要な施設の強度計算書

(1) 冷却塔の強度計算書

V-別添1-2-1 屋外の竜巻
防護対象施設の強度計算書

(1) - 2 安全冷却水 B 冷却塔
の強度計算書

目 次

1. 基本方針	1
1.1 構造概要	2
1.2 評価方針	4
2. 強度評価方法	6
2.1 評価対象部位	6
2.2 荷重及び荷重の組合せ	9
2.3 許容限界	14
2.4 評価方法	15
3. 評価条件	18
4. 評価結果	19

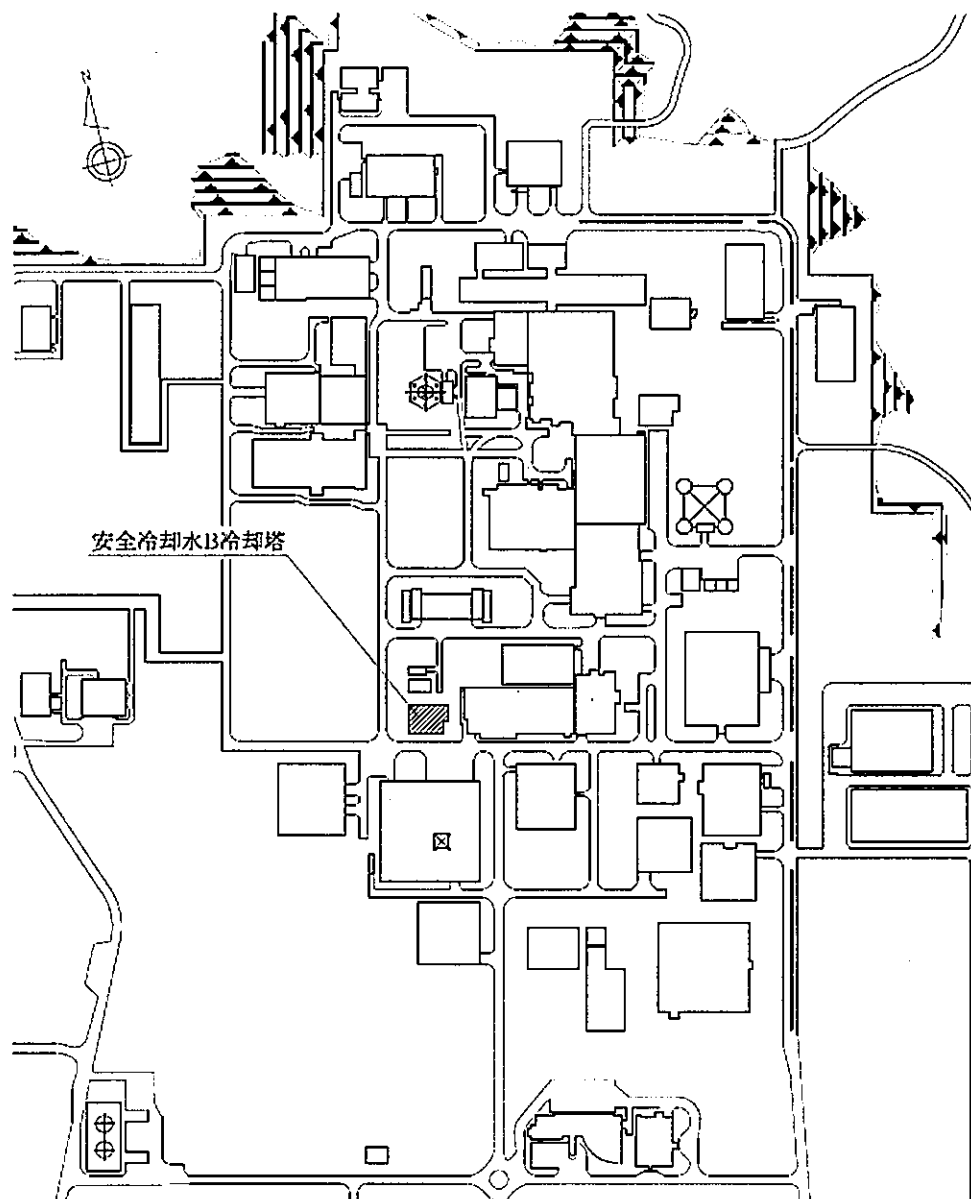
1. 概要

本資料は、添付書類「V-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、屋外の竜巻防護対象施設である安全冷却水B冷却塔が、設計荷重（竜巻）に対して、竜巻防護対象設備の安全機能を損なわないよう、安全冷却水B冷却塔の構造健全性を維持することを確認するものである。

2. 基本方針

2.1 位置

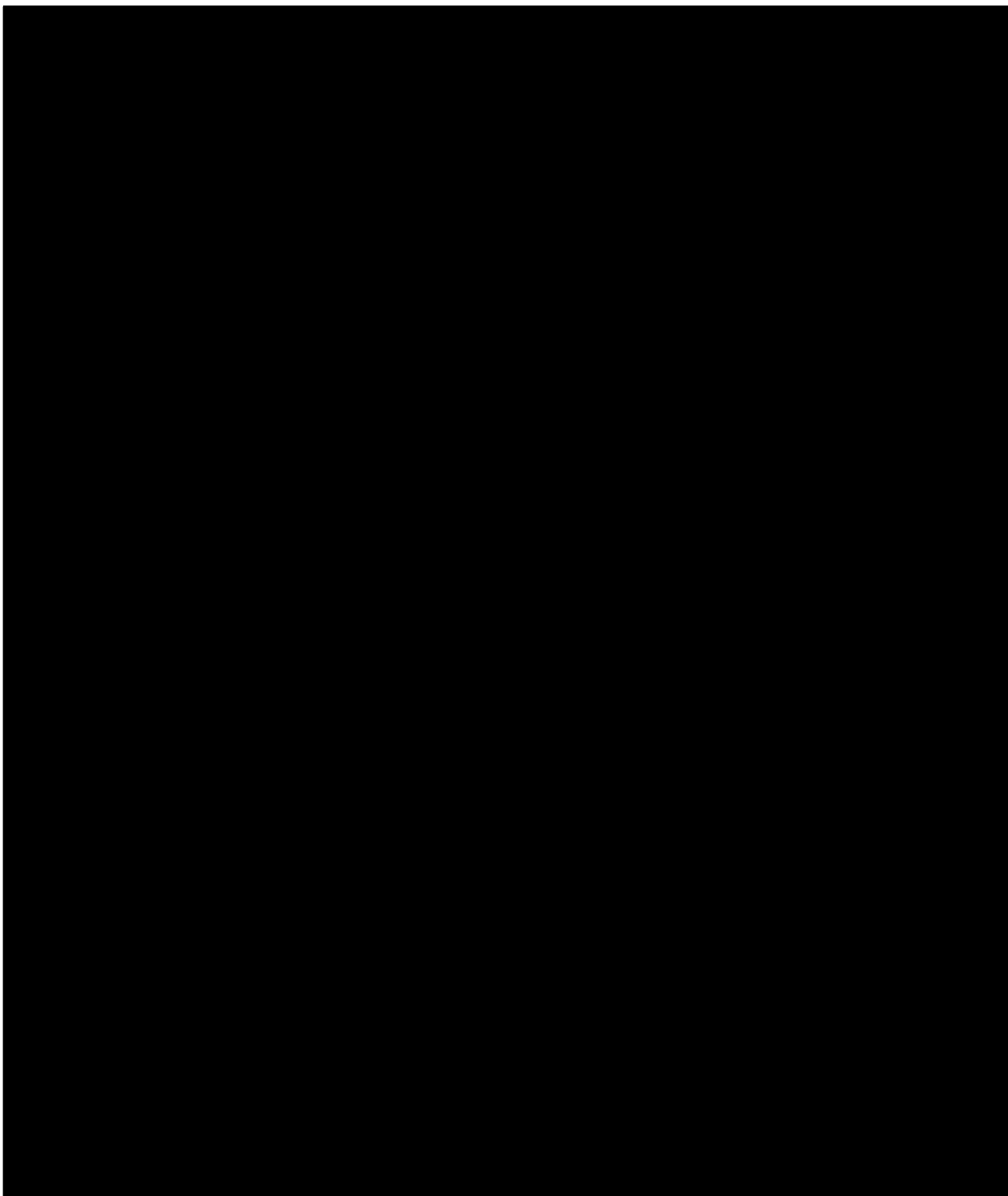
安全冷却水B冷却塔の配置を第2.1-1図に示す。



第 2.1-1 図 安全冷却水B 冷却塔の配置図

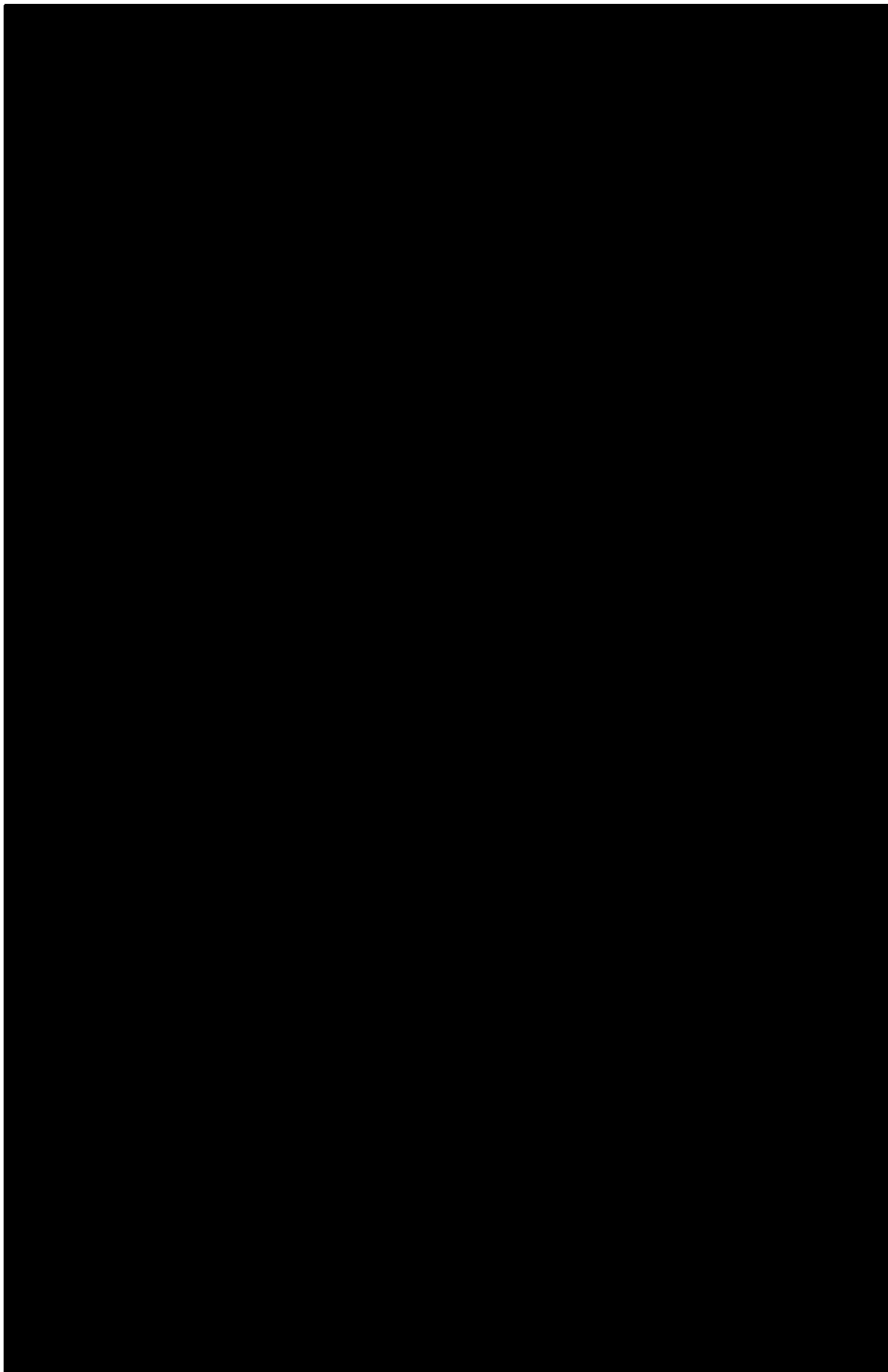


新 R ① JN 安ゴ V 00106 C

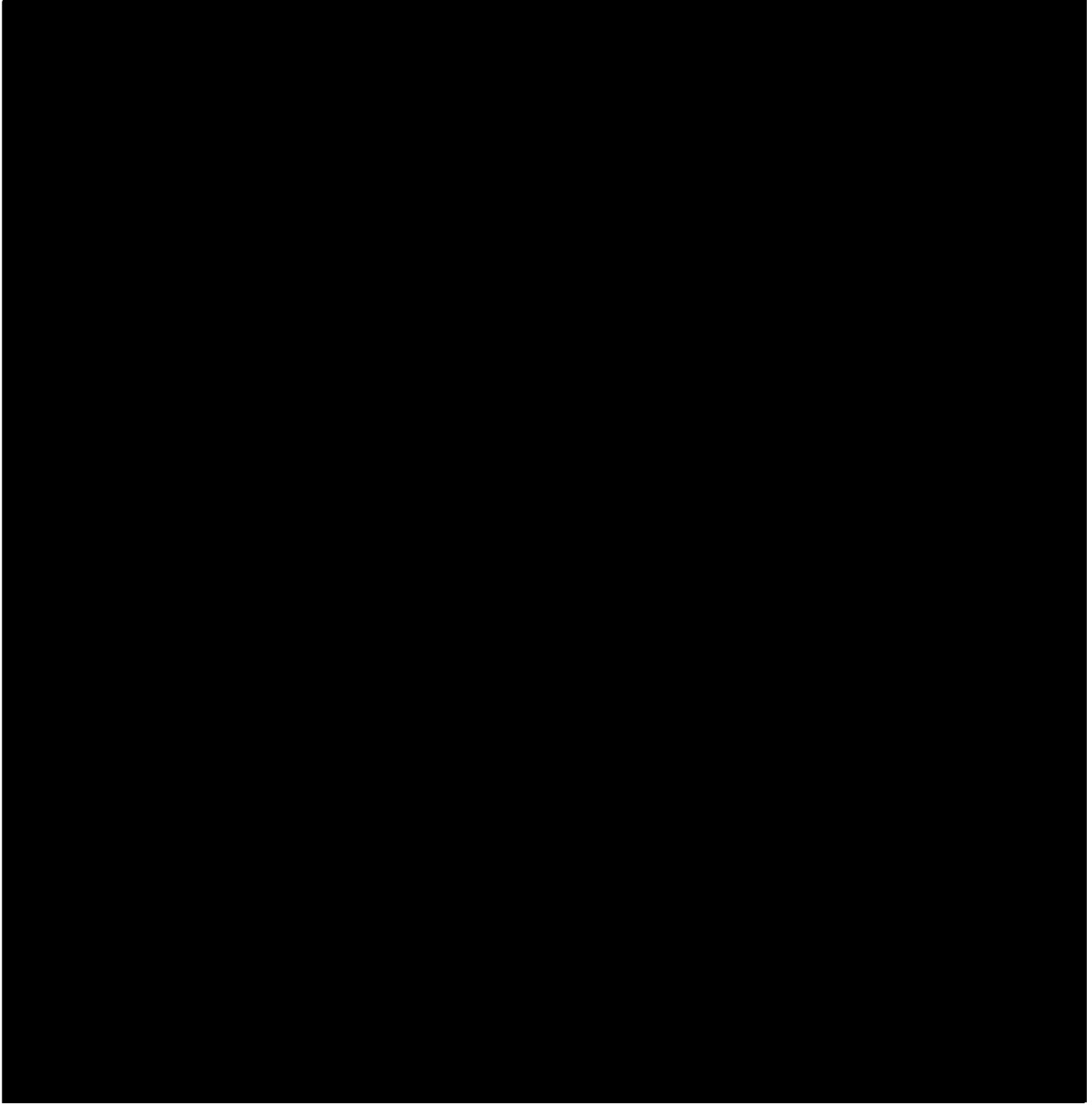




新 R ① JN 安 ㄱ V 00107



新 R ① JN 安コ V 00108 A

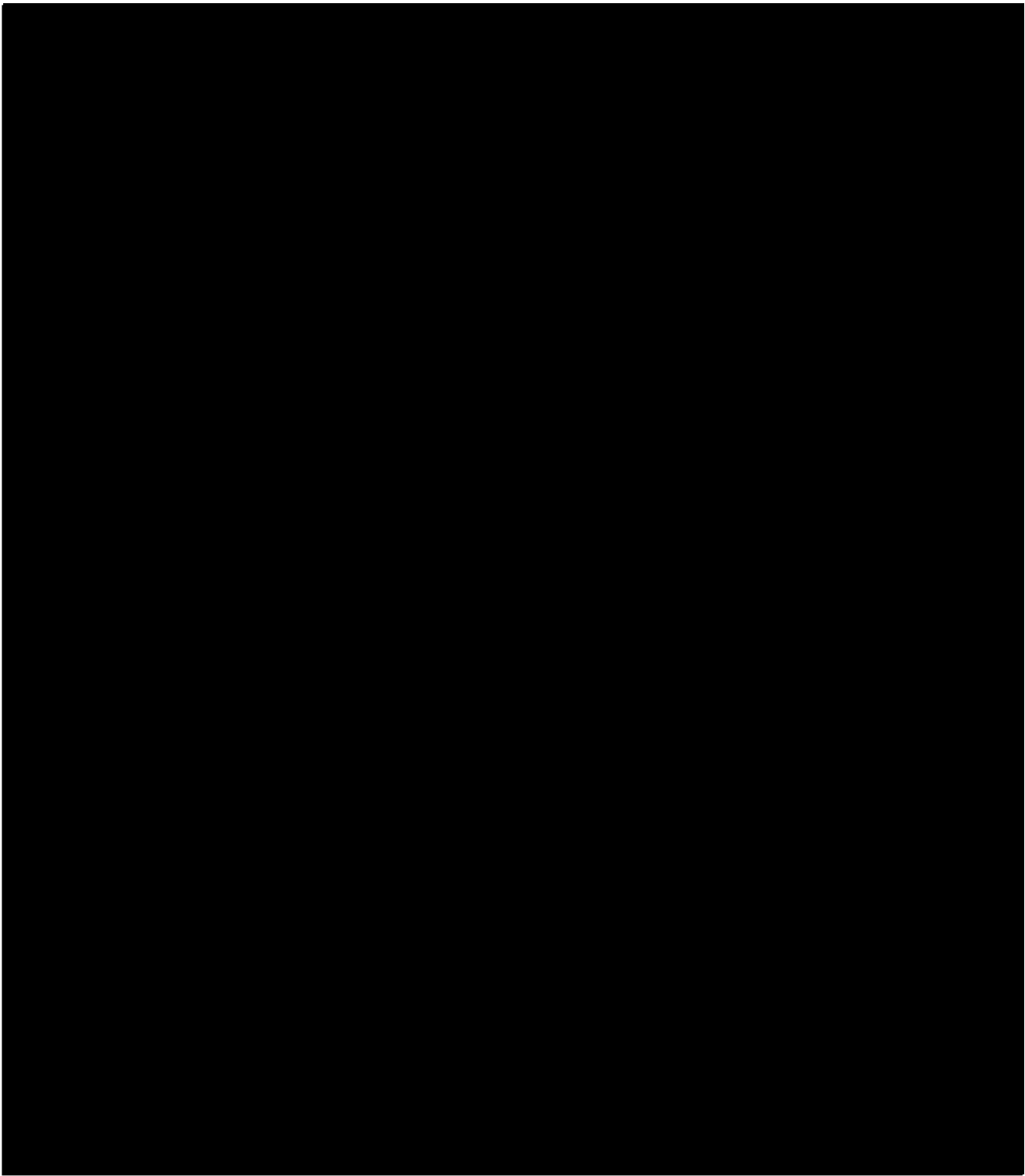


○ 新 R ① JN 安ユ V 00109 A ○



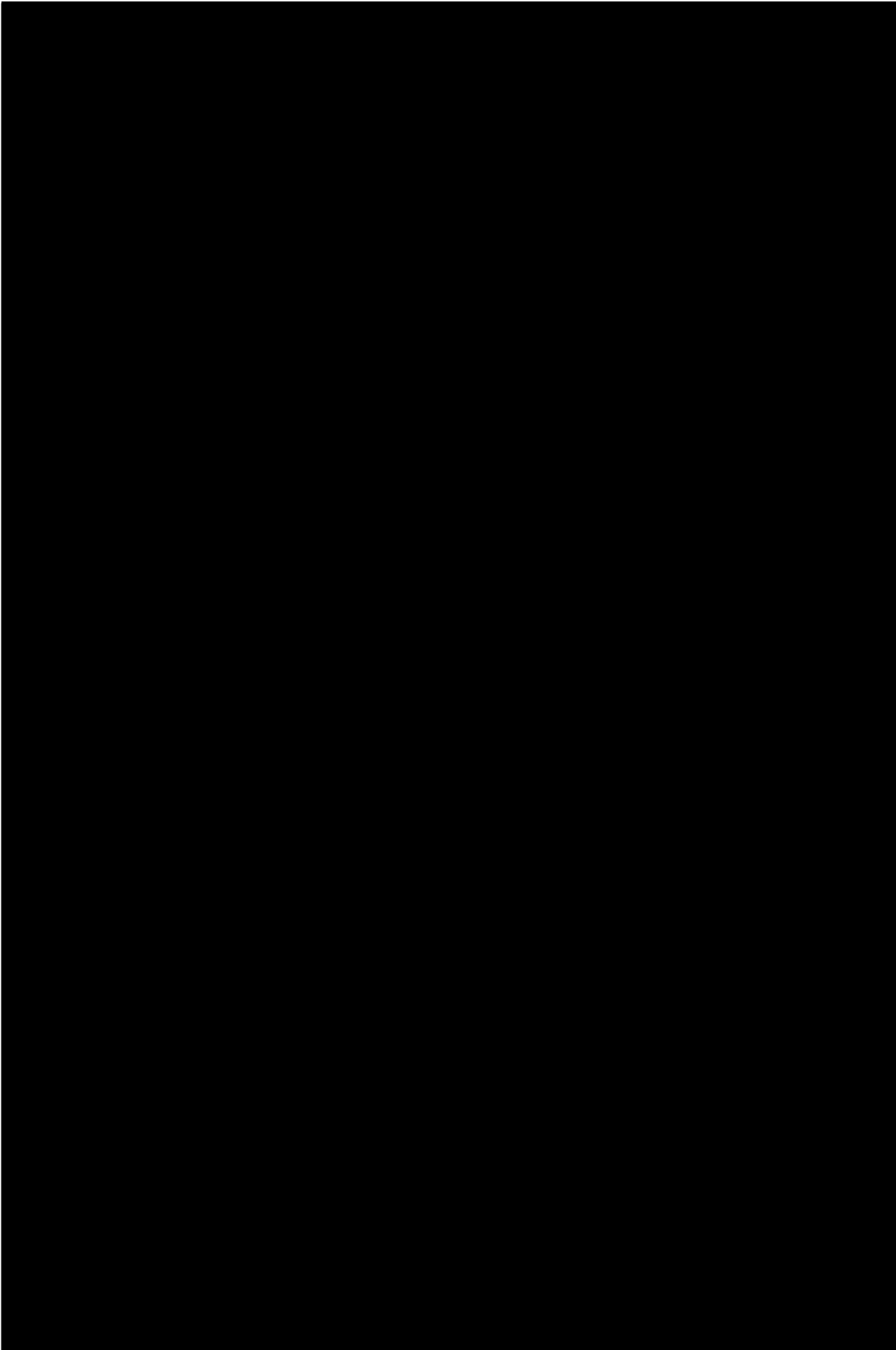


新R① JN 安工 V 00110 A



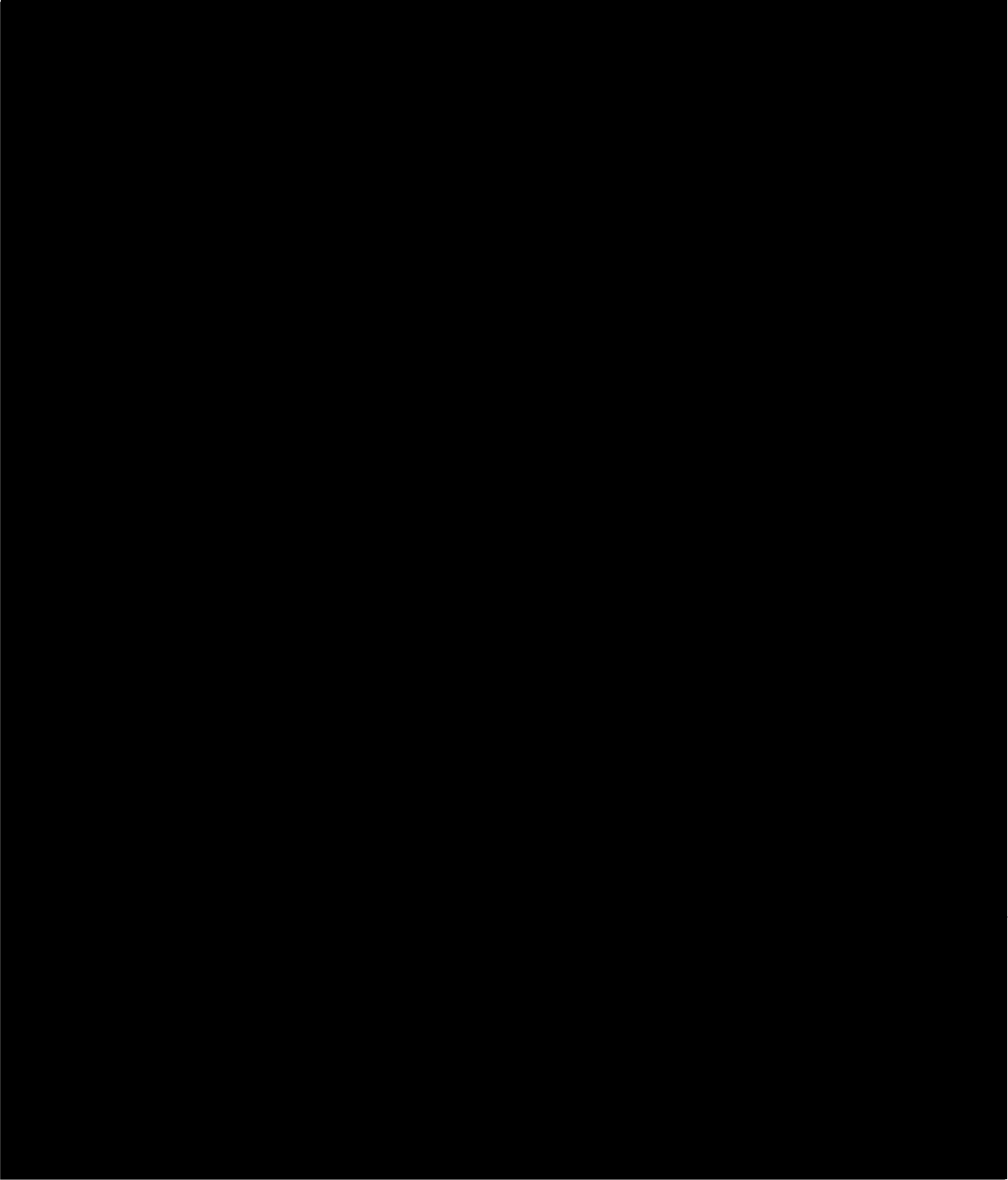


新R① JN 安ユ V 00111 B





新 R ㊦ JN 安コ V 00112 A



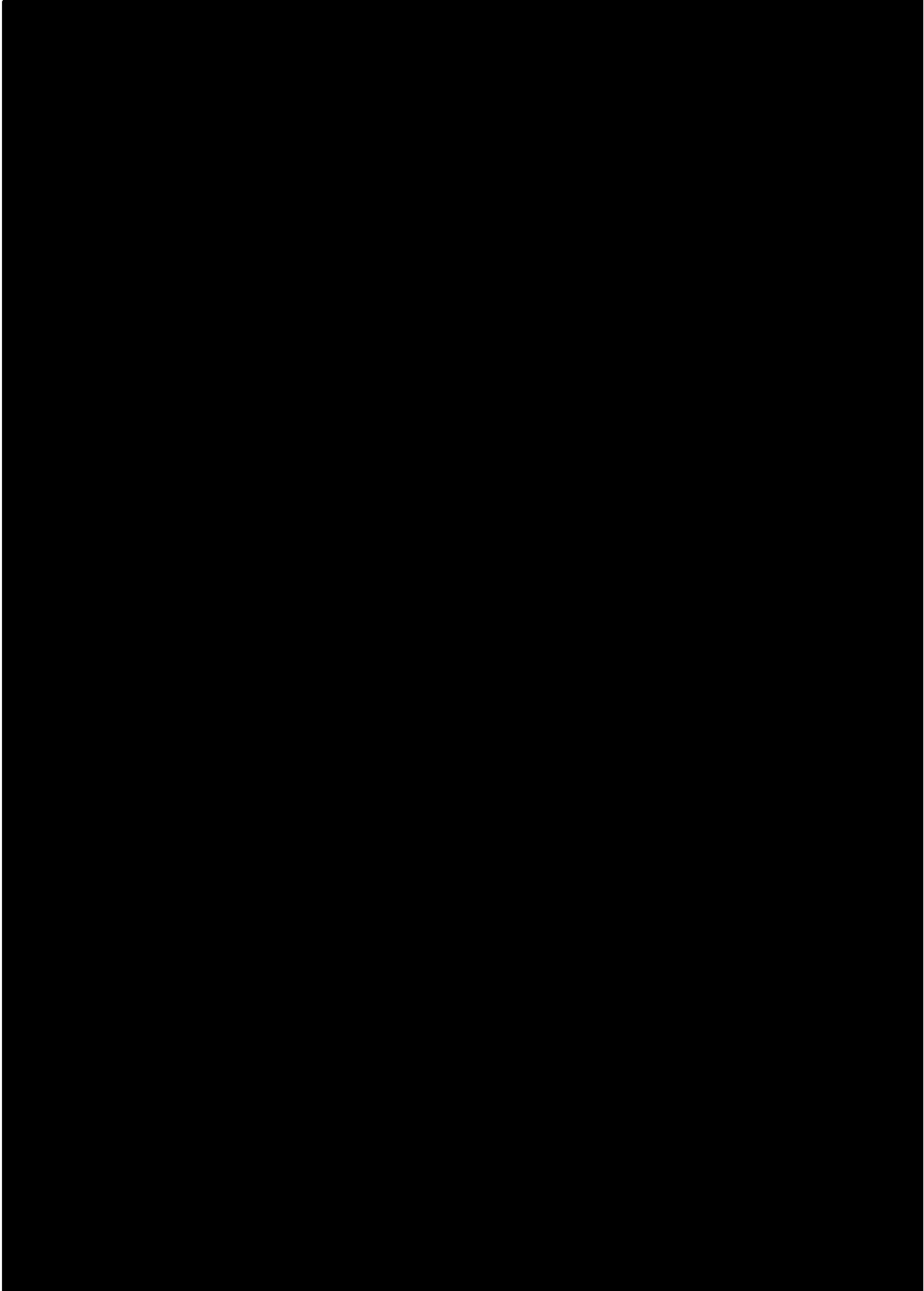
2.4 適用規格

適用する規格，規準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法・同施行令・同告示
- ・ 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005/2007 ((社) 日本機械学会)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987 ((社) 日本電気協会)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-2008 ((社) 日本電気協会)
- ・ ASME 2010 Boiler and Pressure Vessel Code
- ・ 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド (原規技発第1409172号)
- ・ 日本産業規格 (JIS)

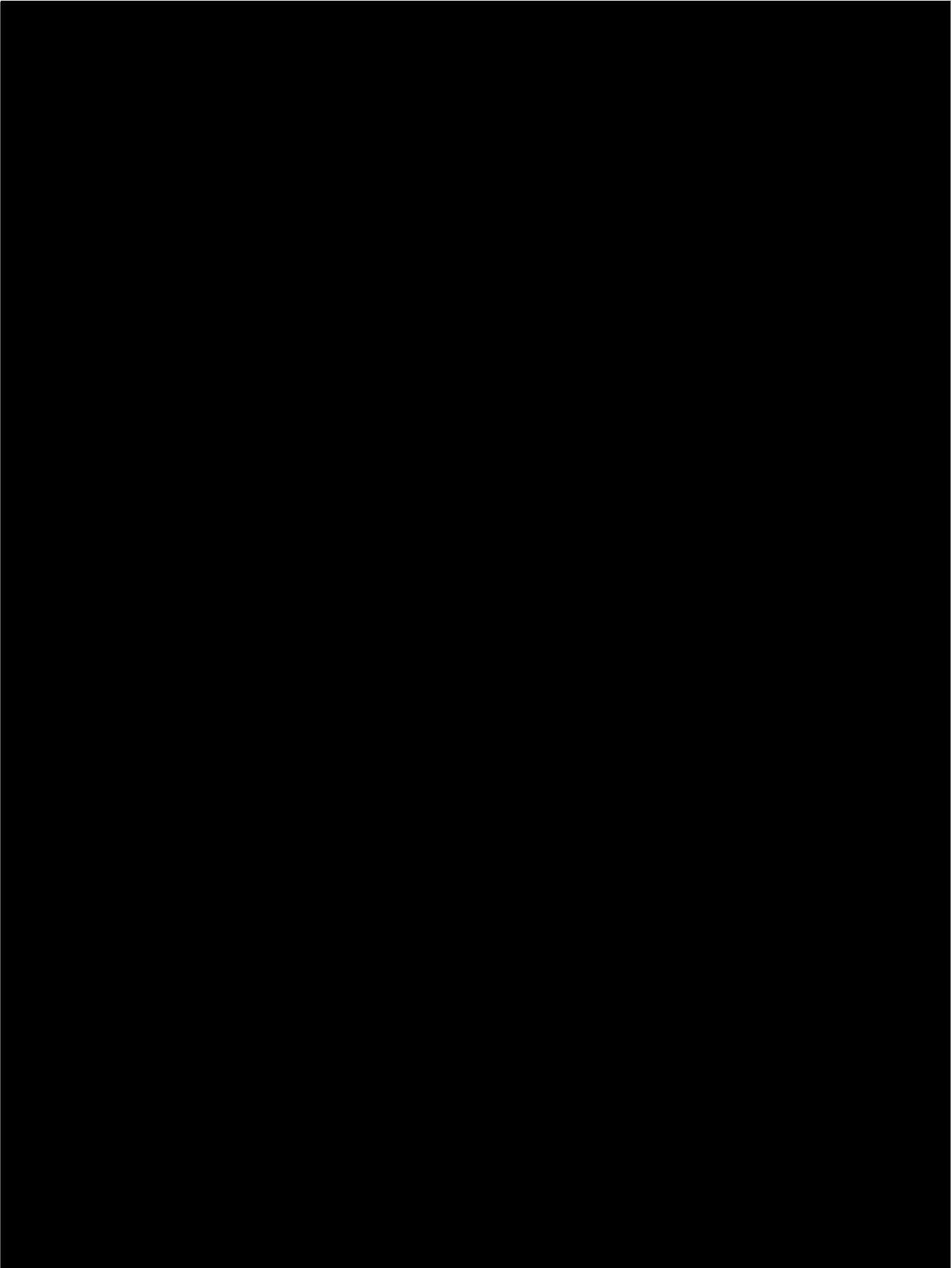


新R① JN 安ユ V 00114 C



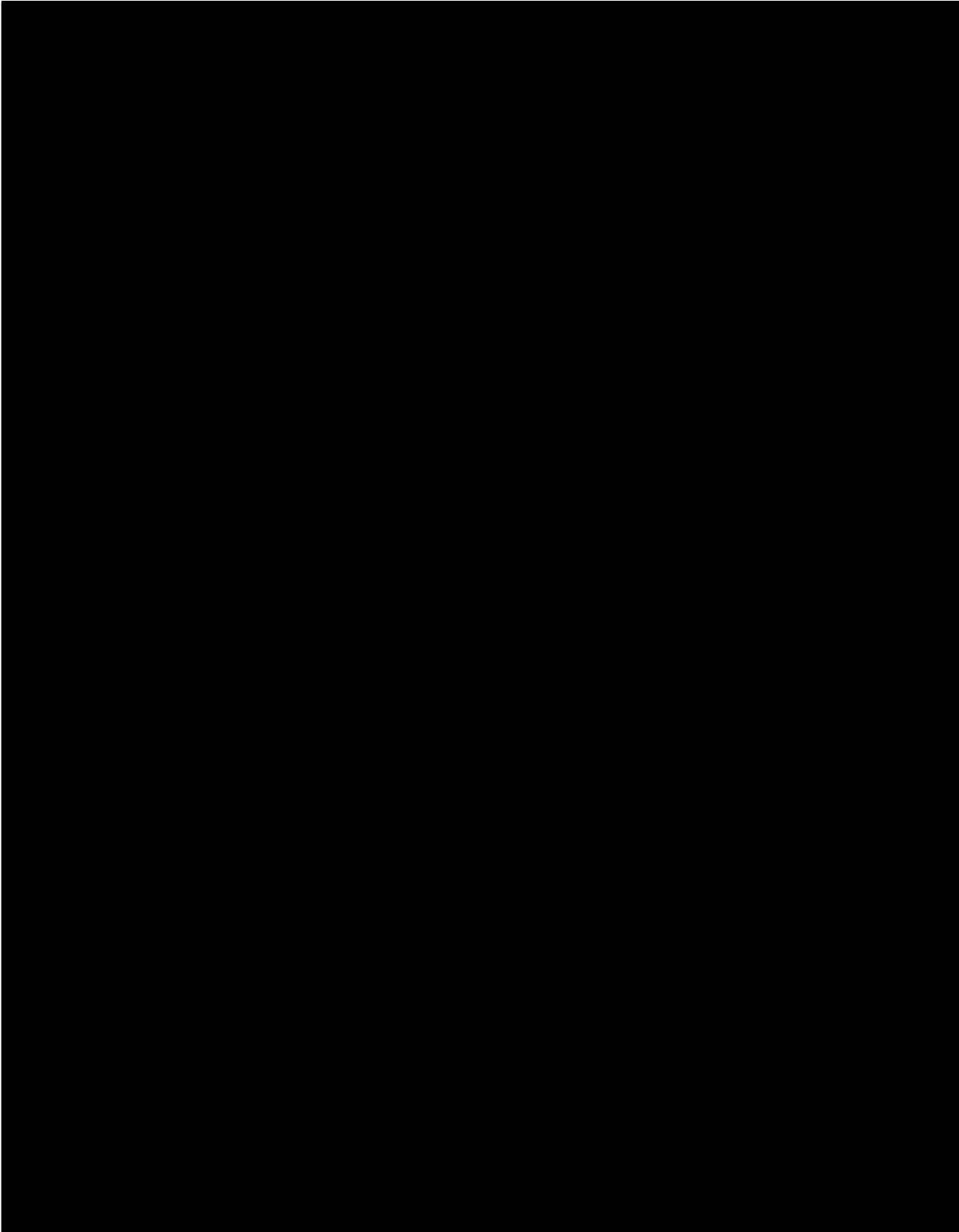


新R① JN 安ユ V 00115 C



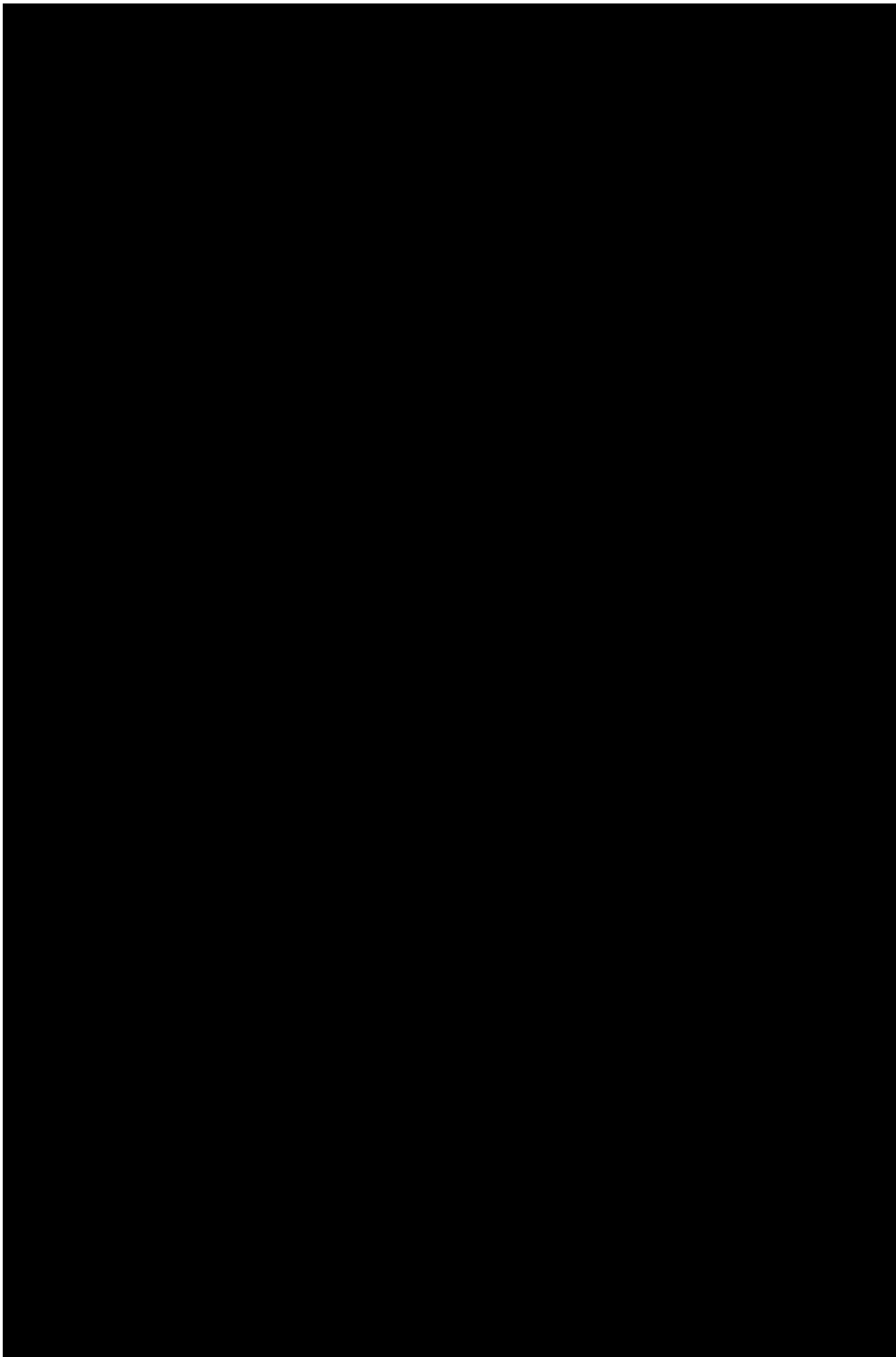


新 R ① JN 安ユ V 00116 B



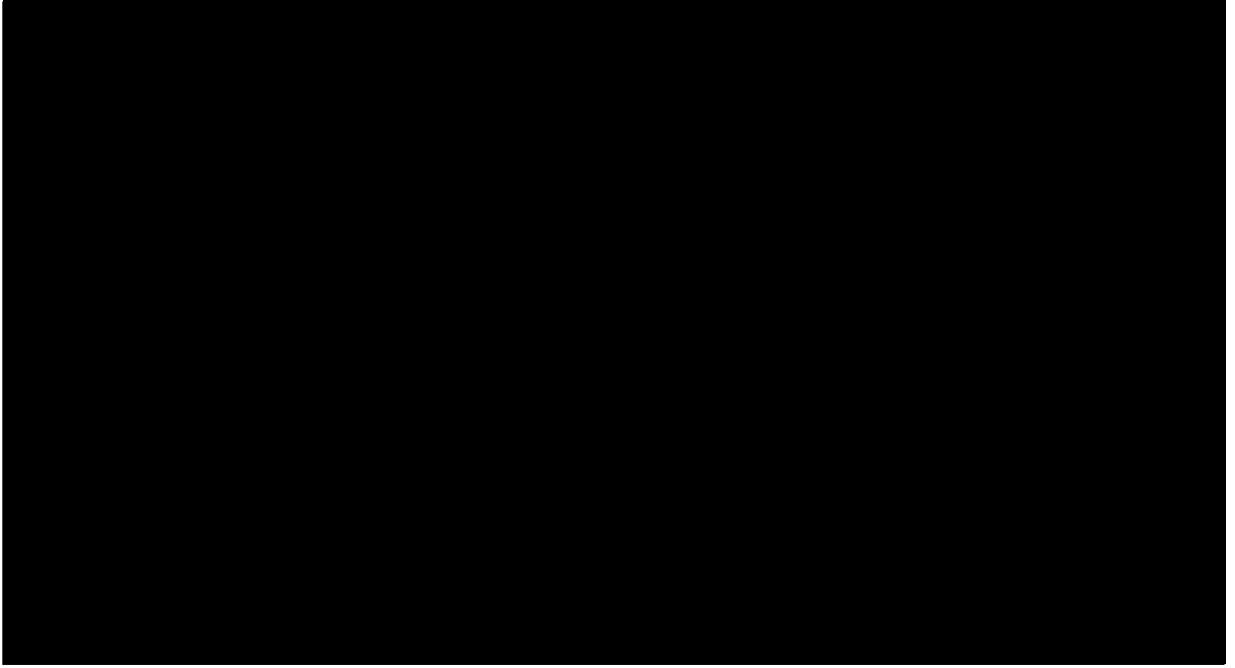


新R① JN 安ユ V 00117 B



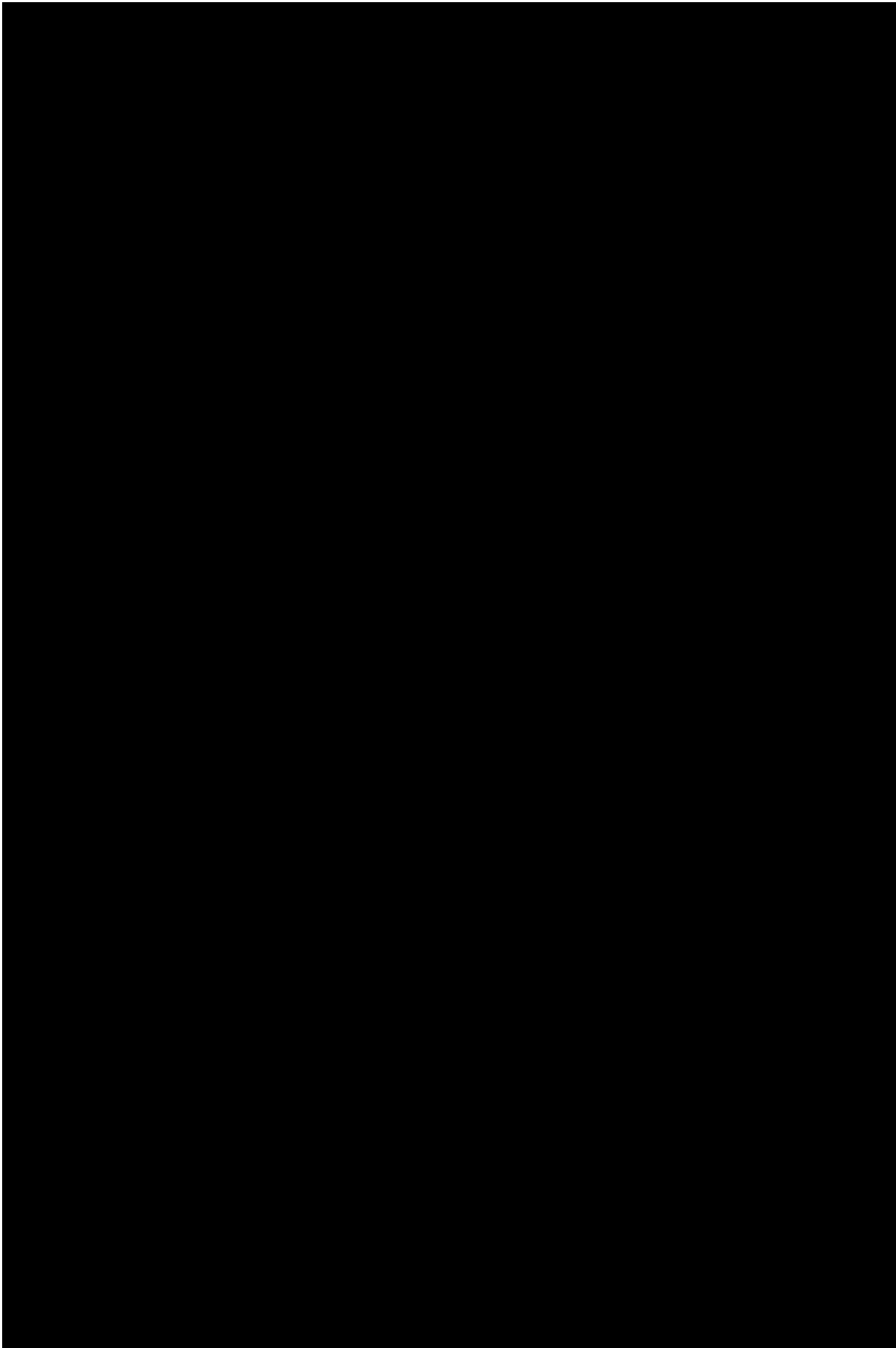


新R ㊦ JN 安ユ V 00118 B



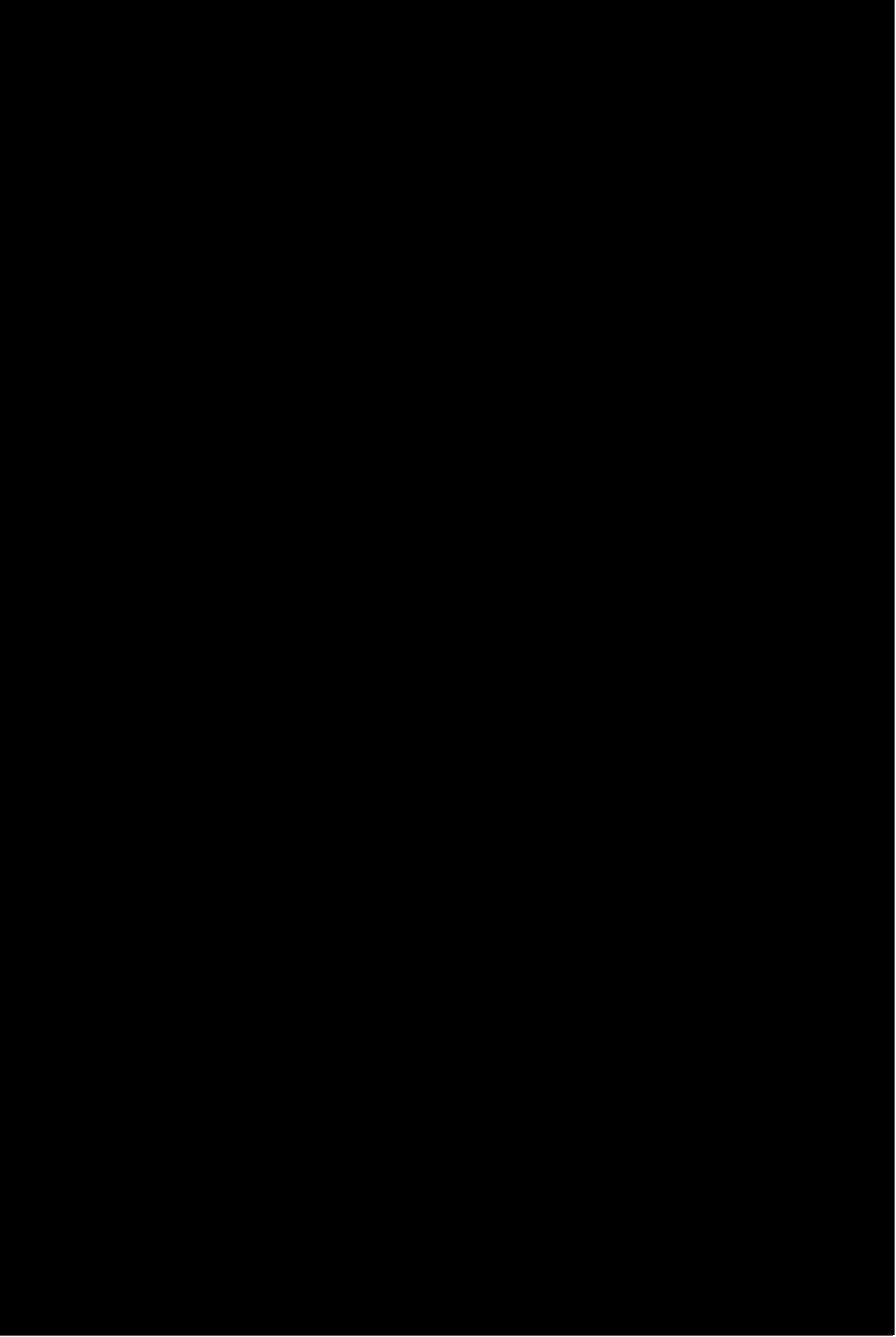


新R① JN 安ユ V 00119 A



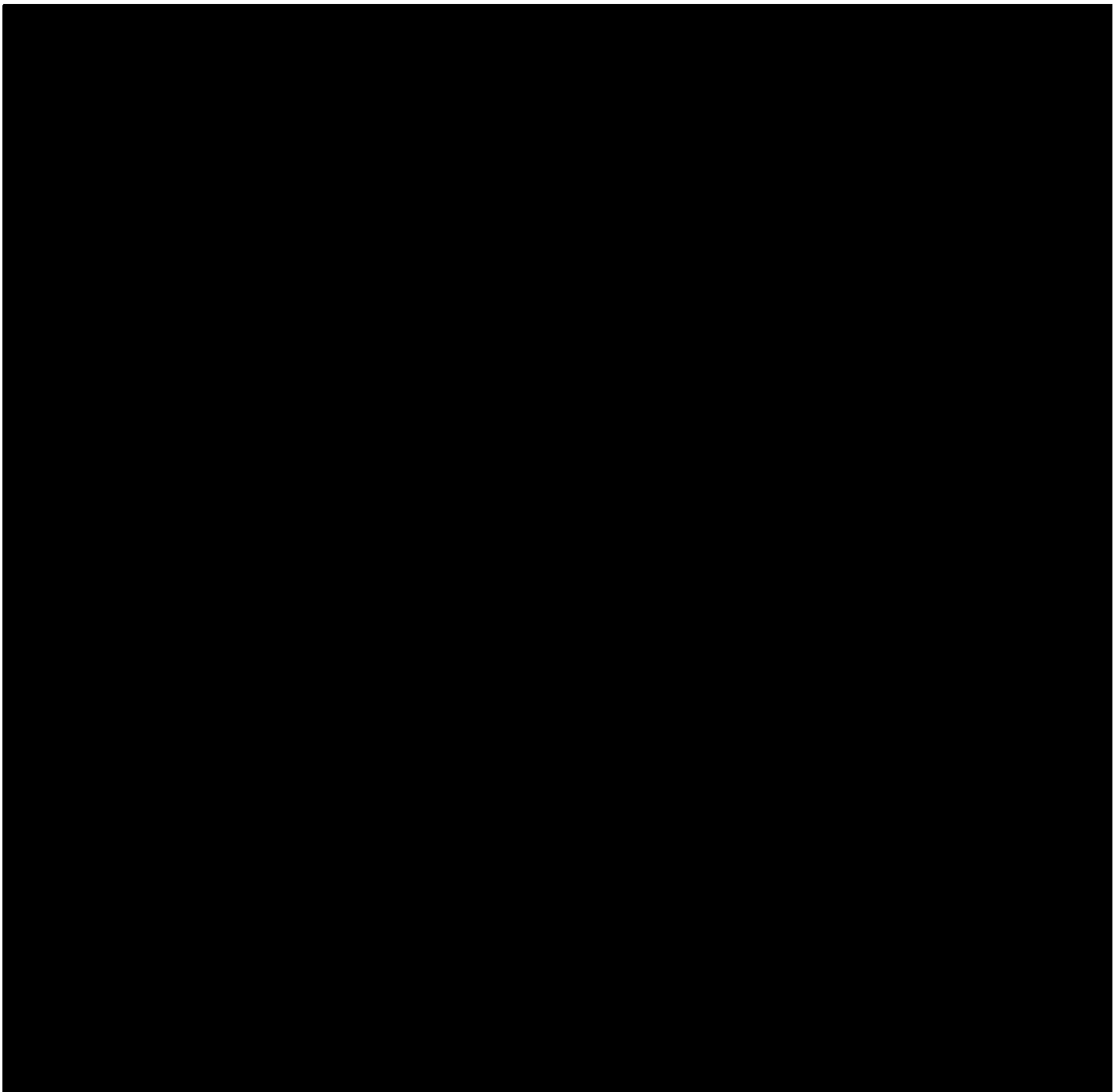


新R① JN 安コ V 00120 B

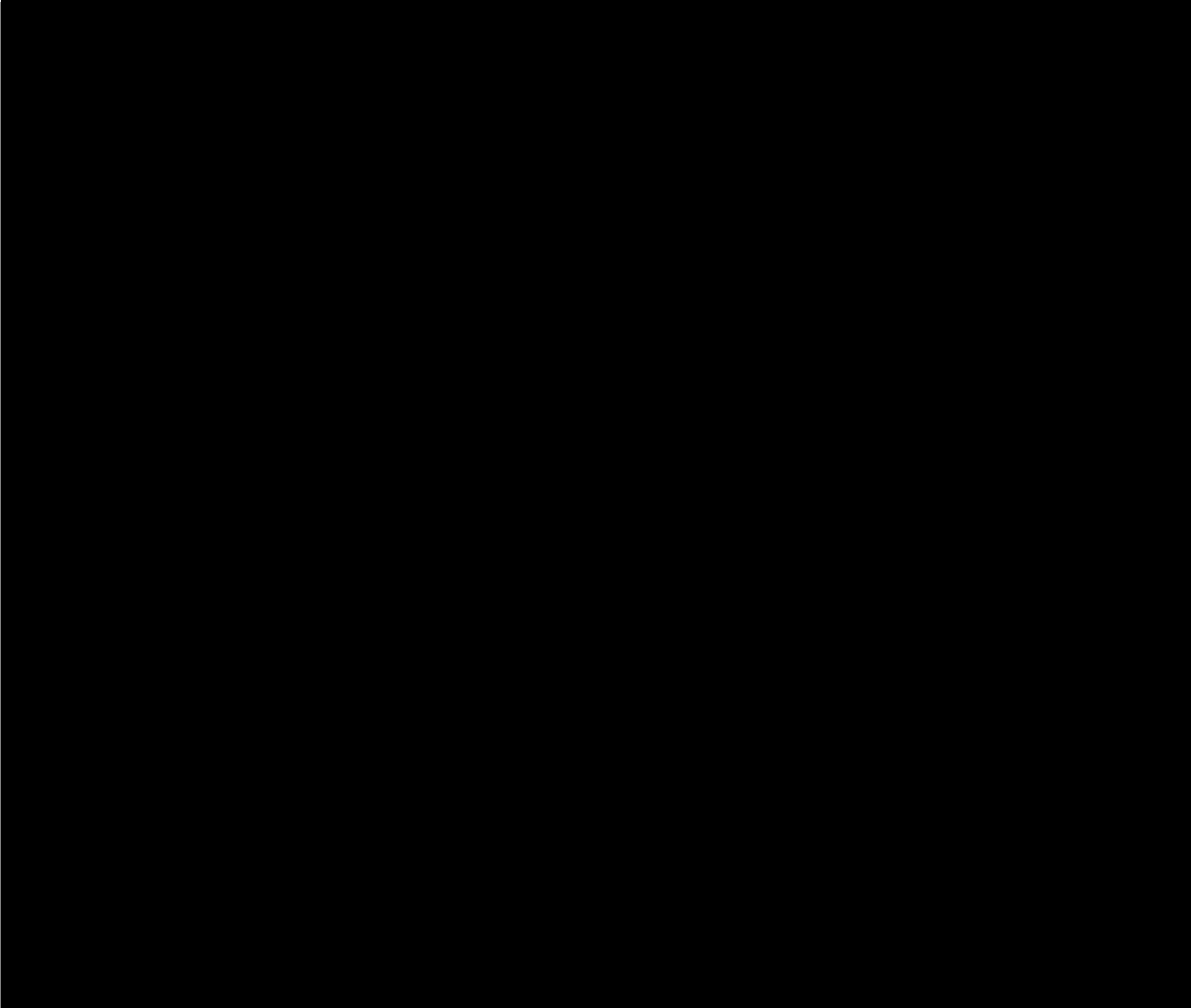




新R① JN 安ユ V 00121 A

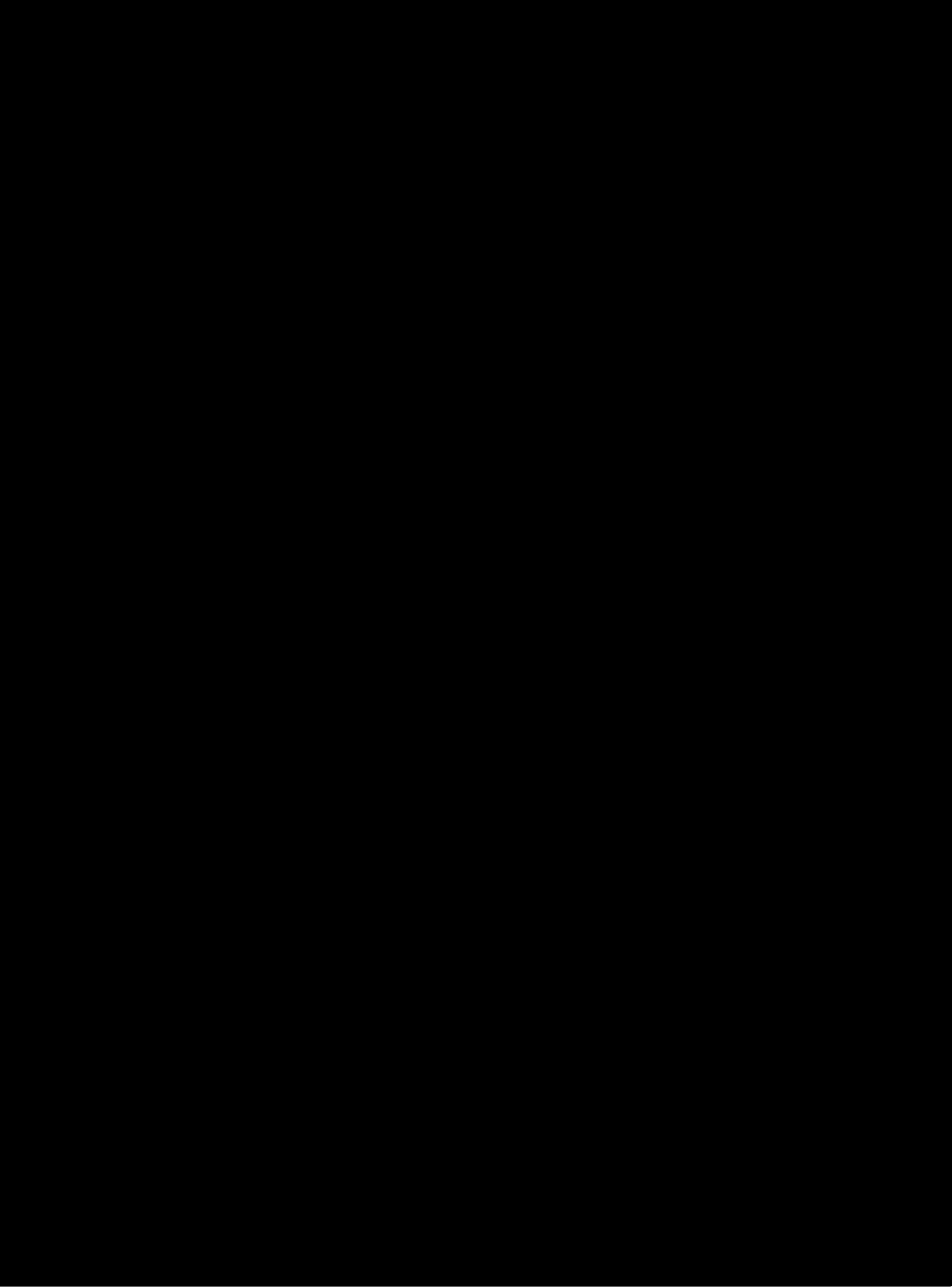


新 R ① JN 安ユ V 00122 B



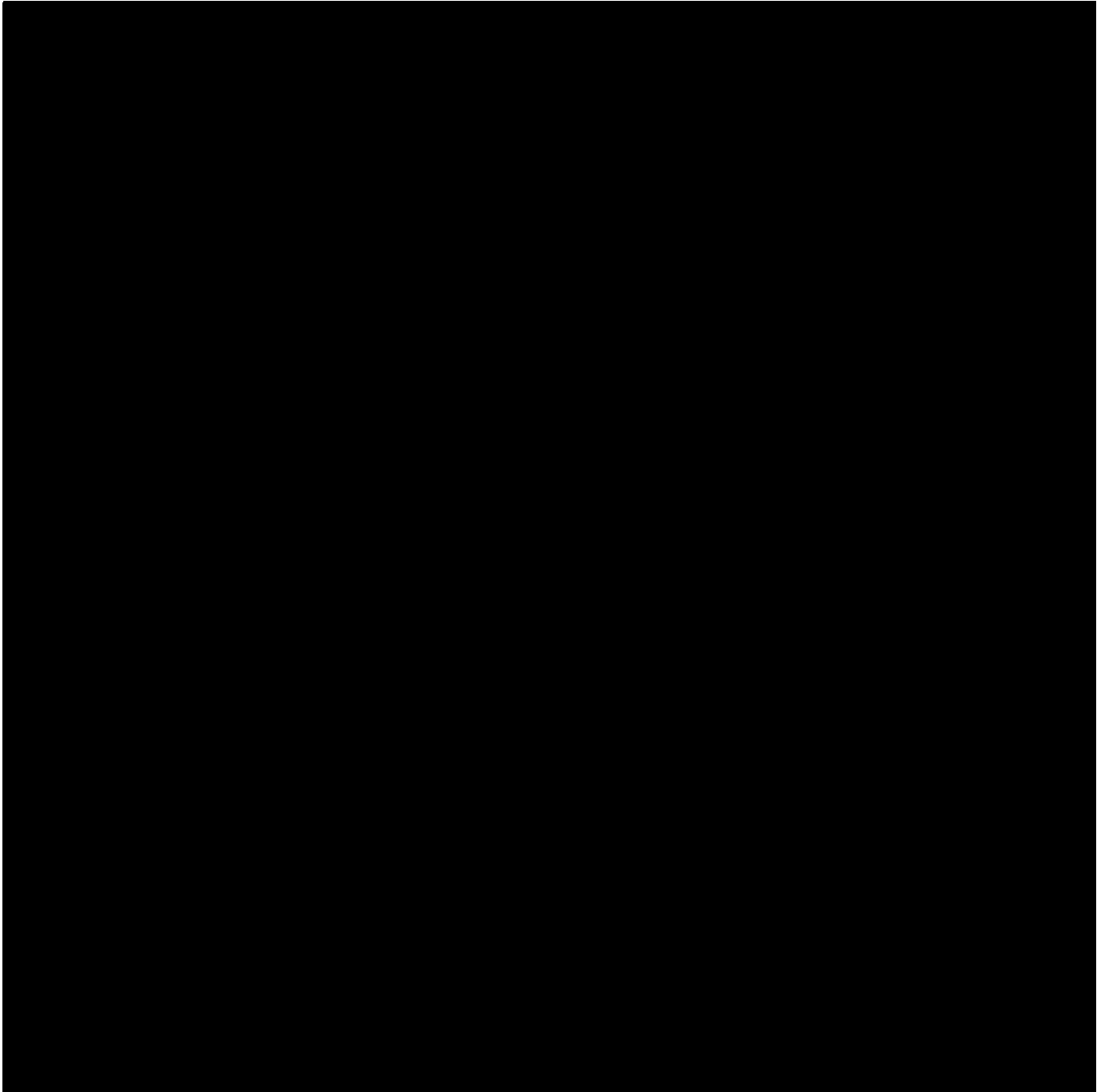


新R ① JN 安ユ V 00123 A



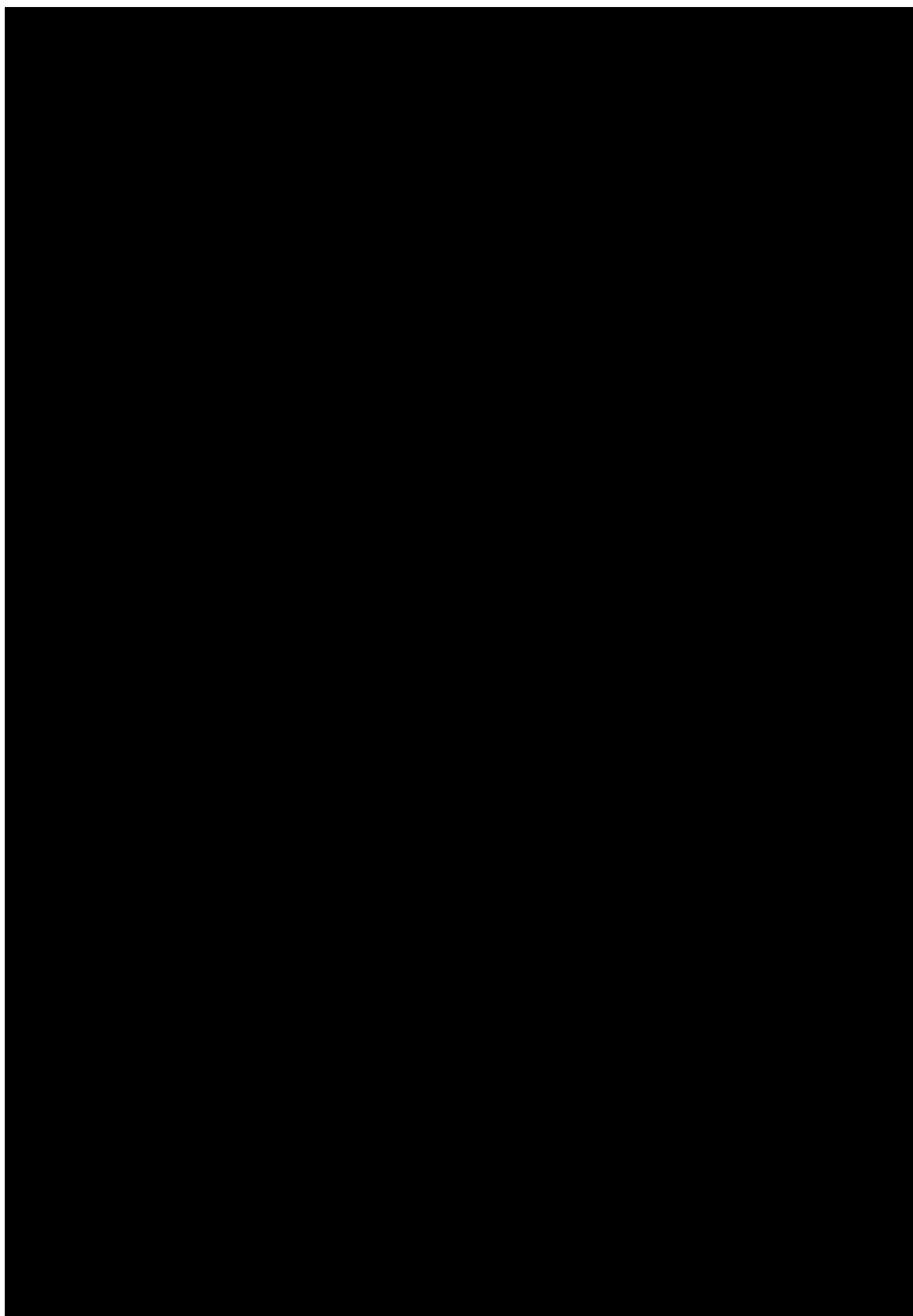


新R① JN 安ゴ V 00124 B



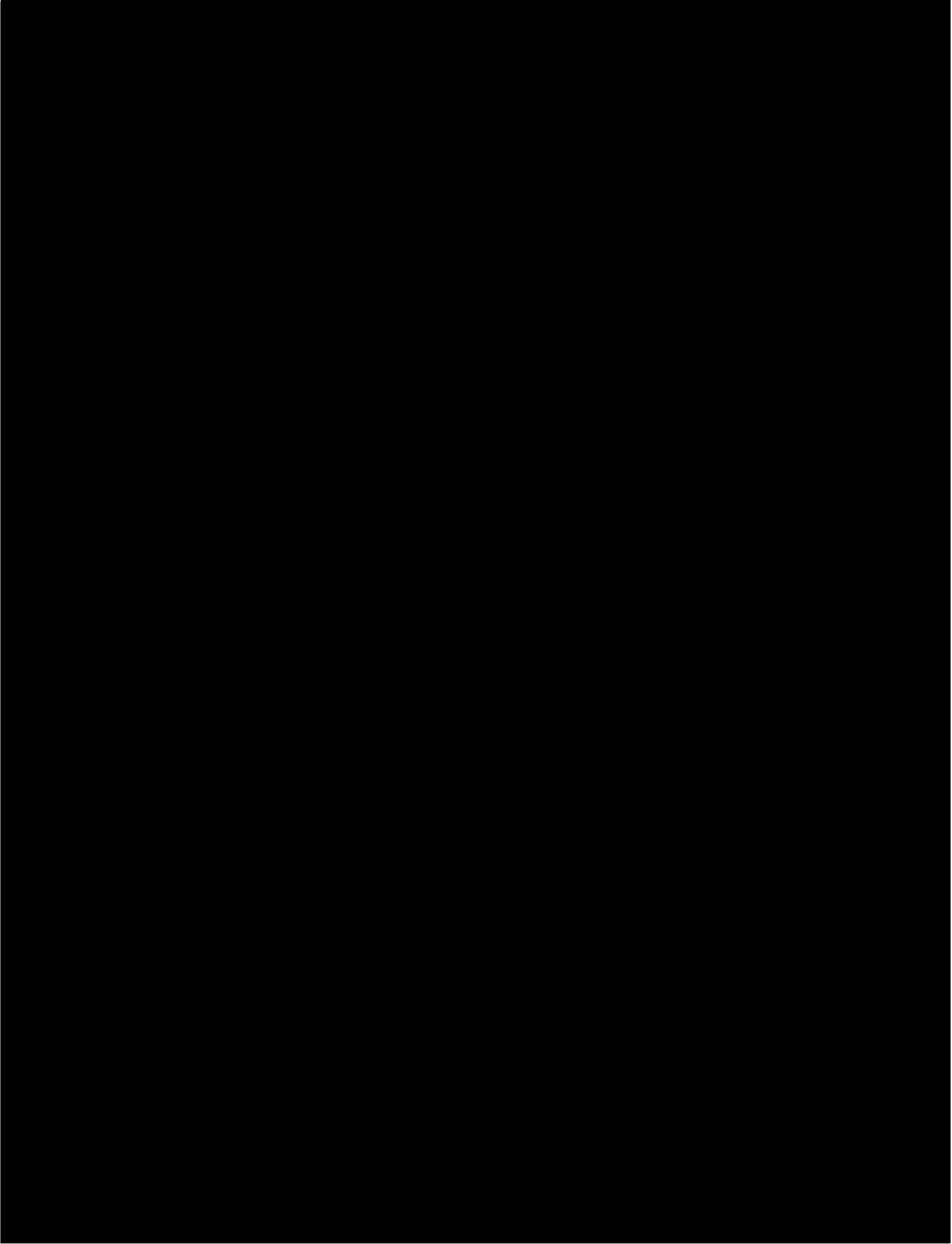


新R① JN 安工 V 00125 A



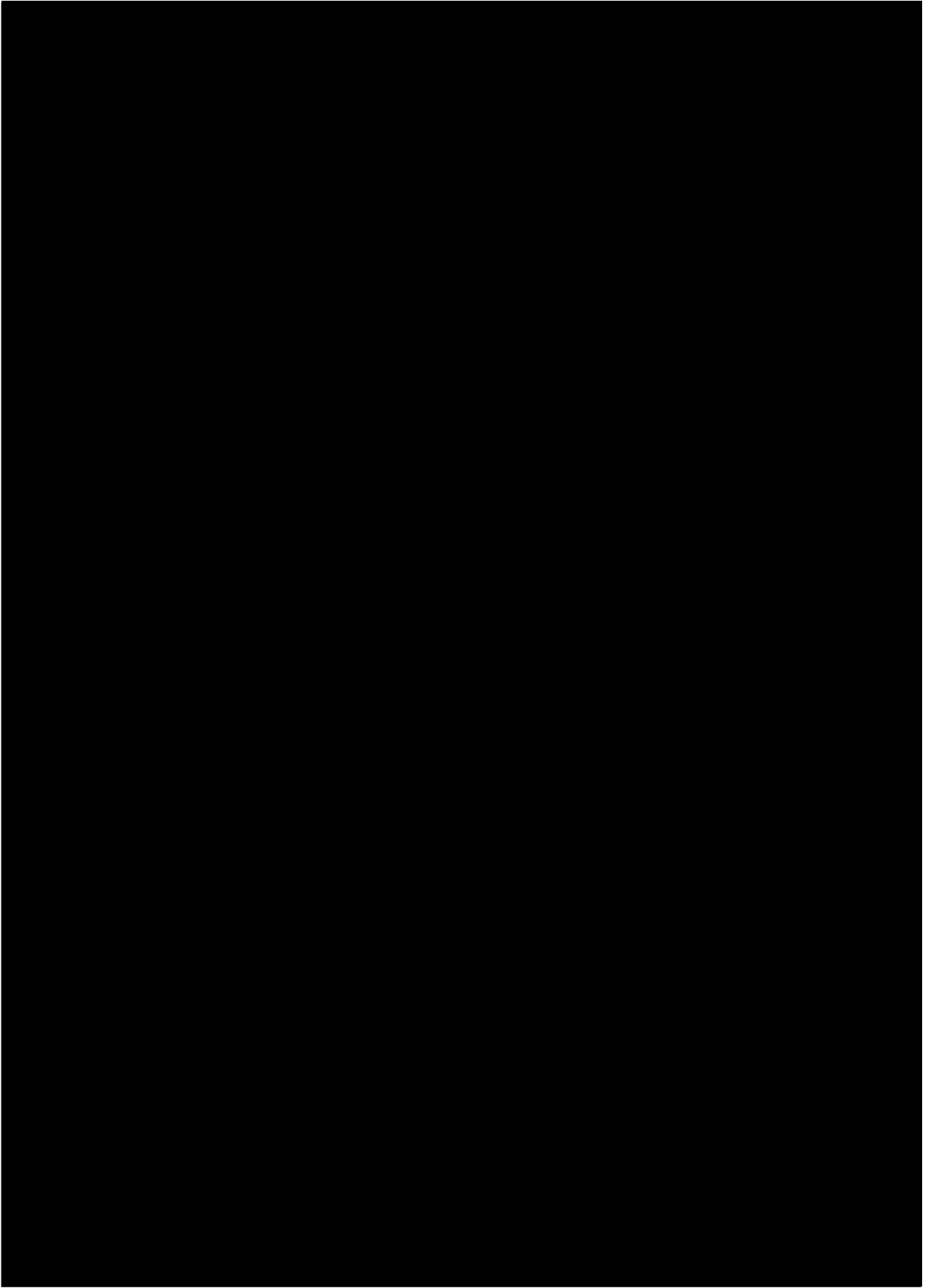


新 R ① JN 安工 V 00126 B



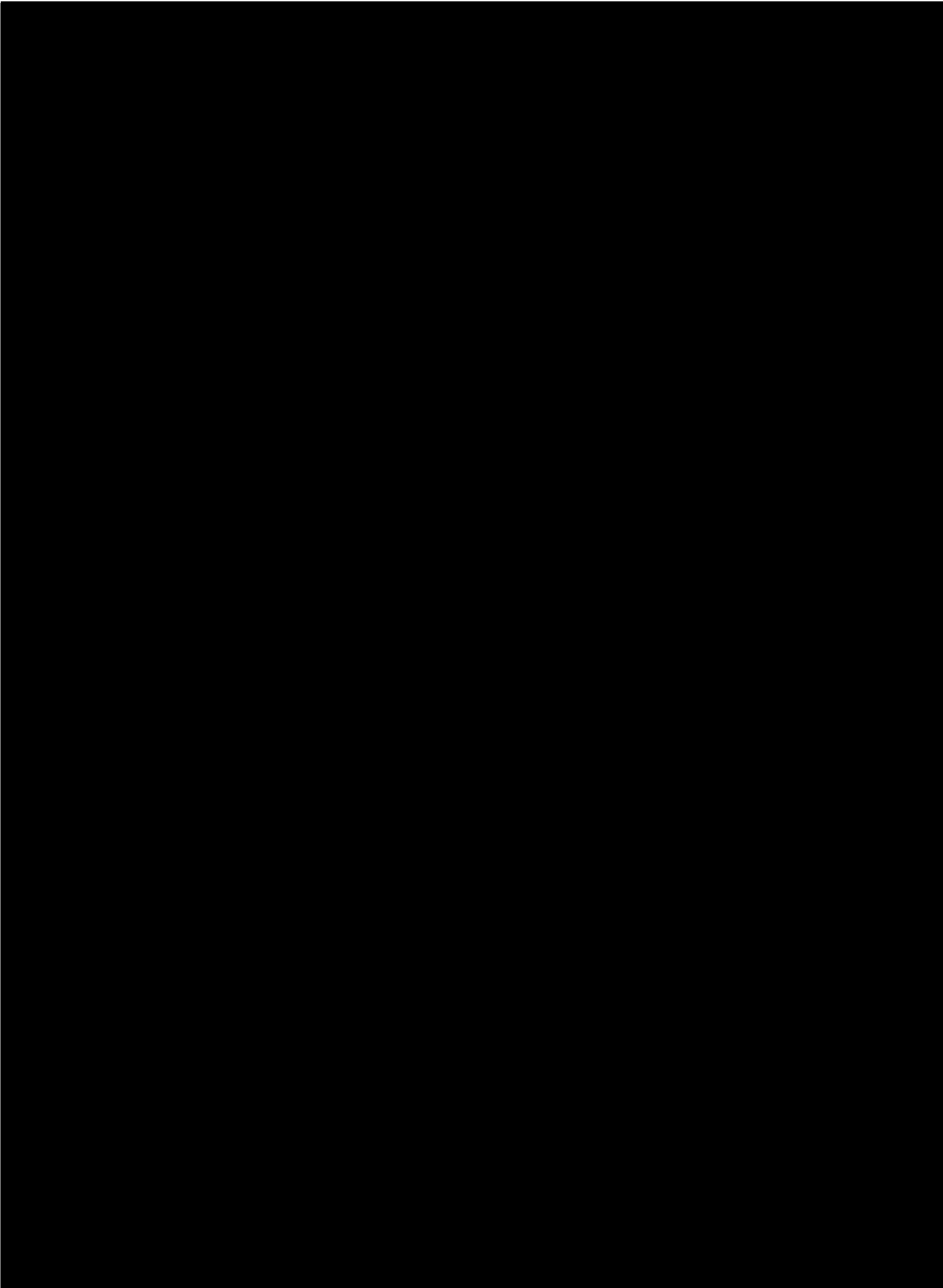


新 R ① JN 安コ V 00127 A



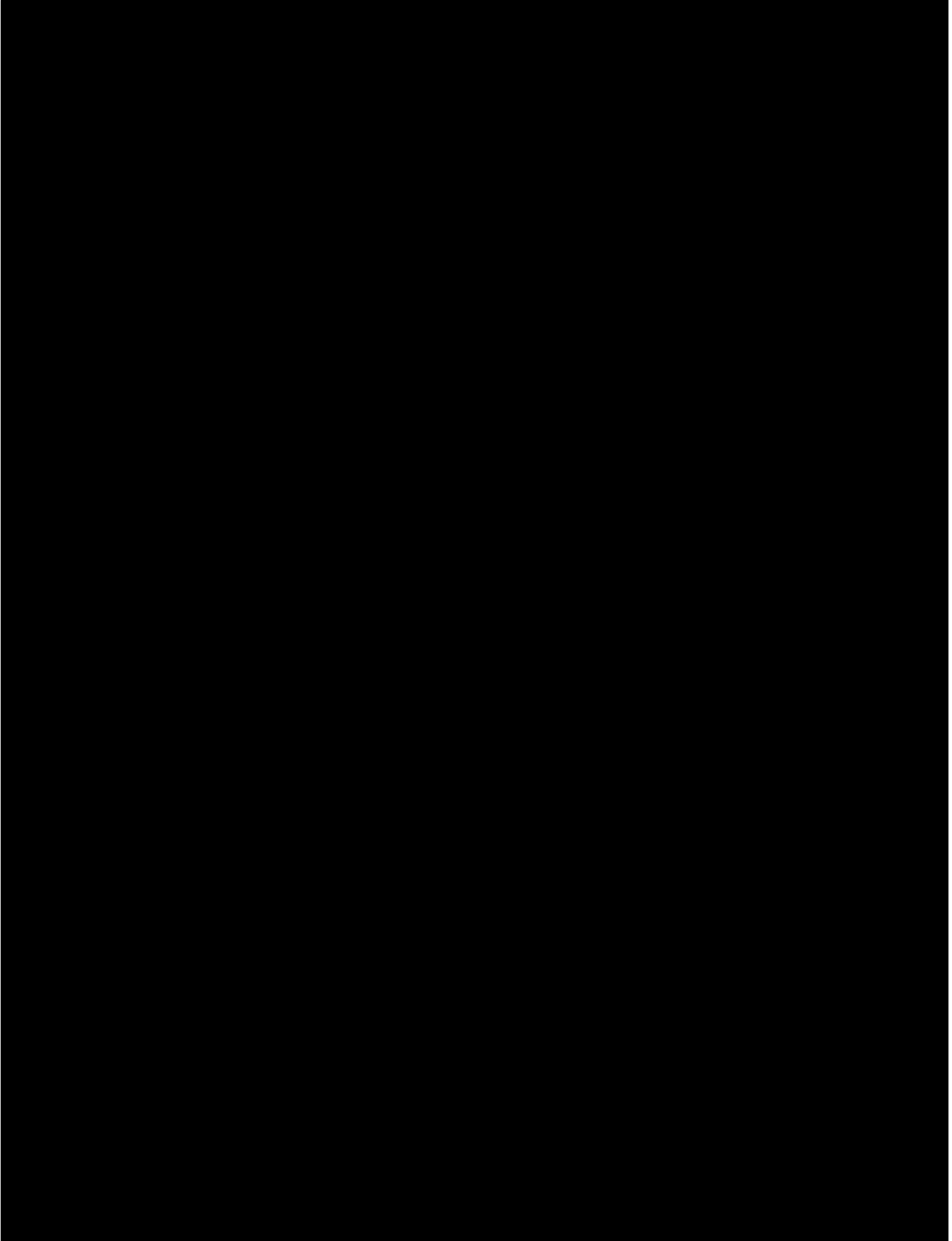


新R① JN 安ユ V 00128 A



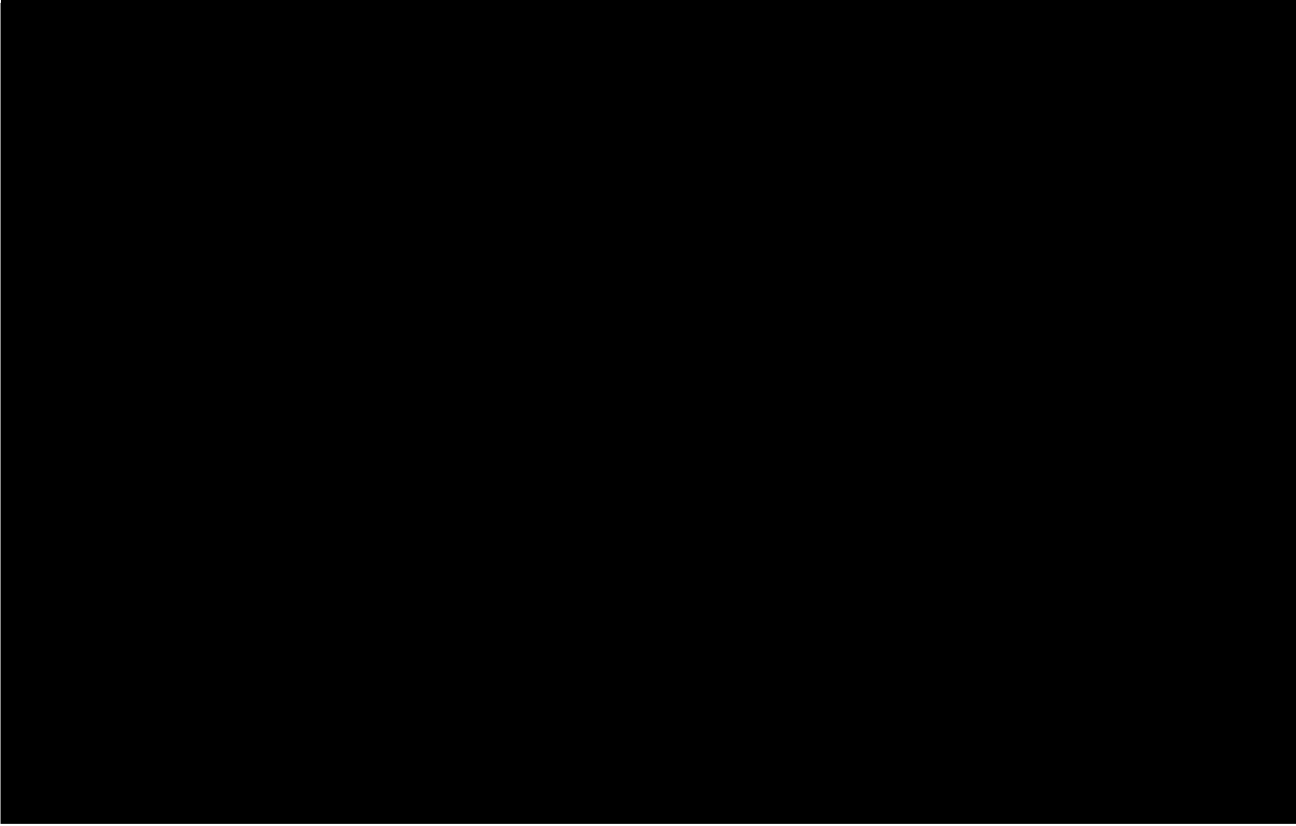


新R ① JN 安ユ V 00129 A



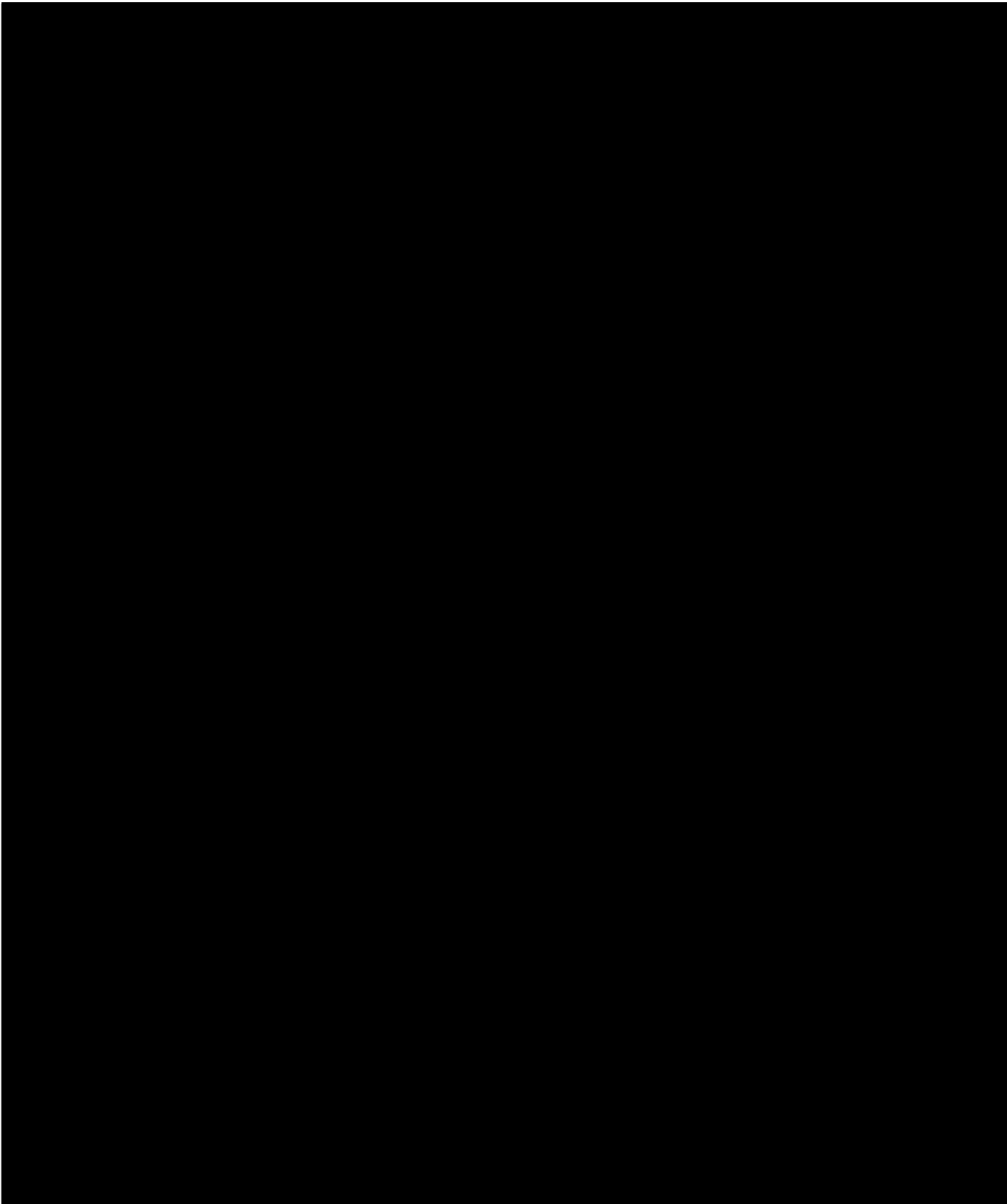


新 R ① JN 安ユ V 00130 B





新 R ① JN 安ユ V 00131 B



(2) 安全冷却水系の配管の強度計算書

(2) - 2 安全冷却水 B 冷却塔
の配管の強度計算書

目 次

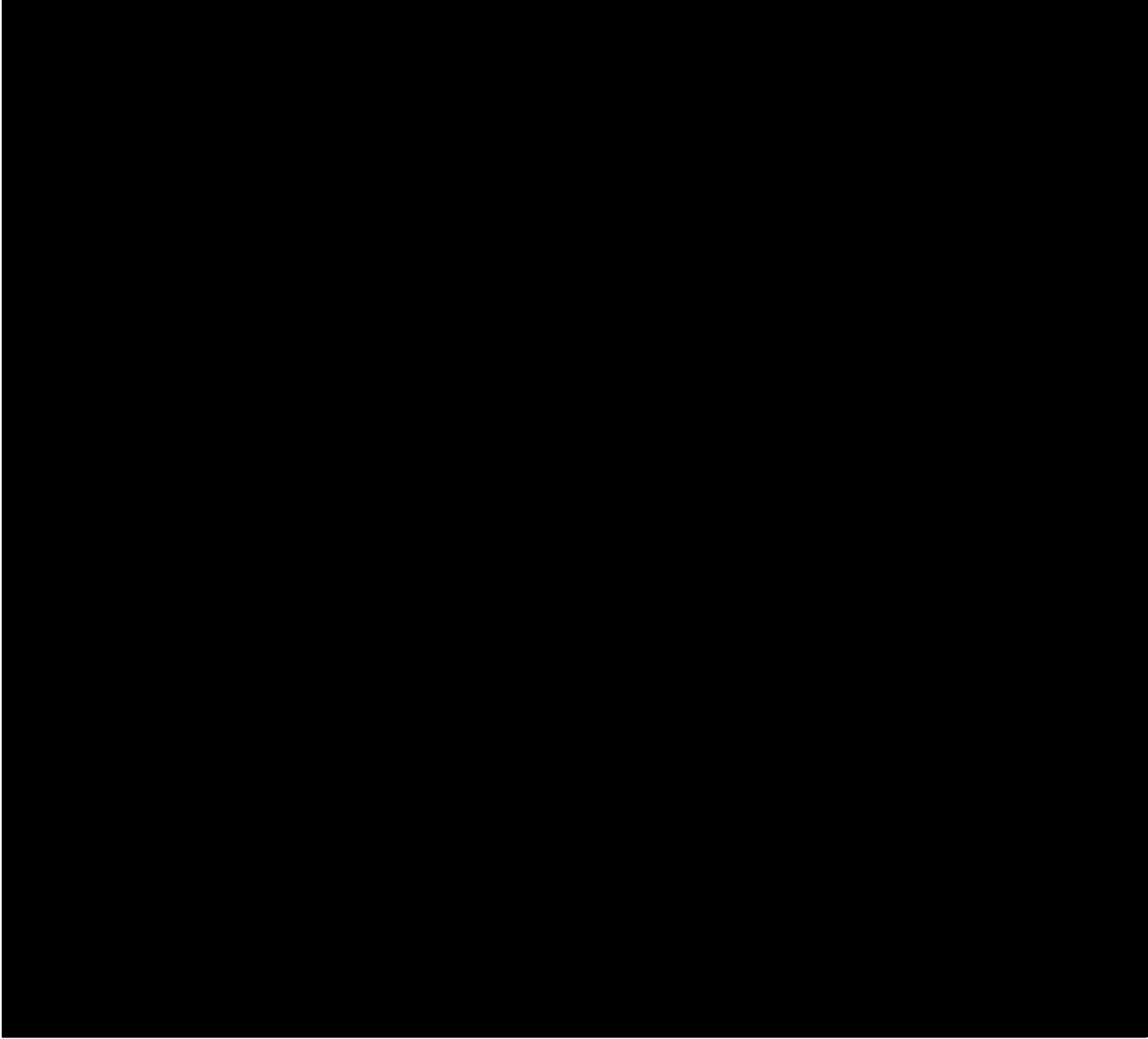
1. 概 要	1
2. 基本方針	2
2.1 位 置	2
2.2 構造概要	2
2.3 評価方針	3
2.4 適用規格	4
3. 強度評価方法	5
3.1 記号の定義	5
3.2 評価対象部位	6
3.3 荷重及び荷重の組合せ	7
3.4 許容限界	8
3.5 評価方法	9
4. 評価条件	12
5. 強度評価結果	14

1. 概要

本資料は、添付書類「V-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、屋外の竜巻防護対象施設である安全冷却水B冷却塔まわりの配管（安全冷却水B冷却塔～前処理建屋）が、設計荷重（竜巻）に対して、竜巻防護対象施設の安全機能を損なわないよう、配管の主要構造の構造健全性を維持することを確認するものである。

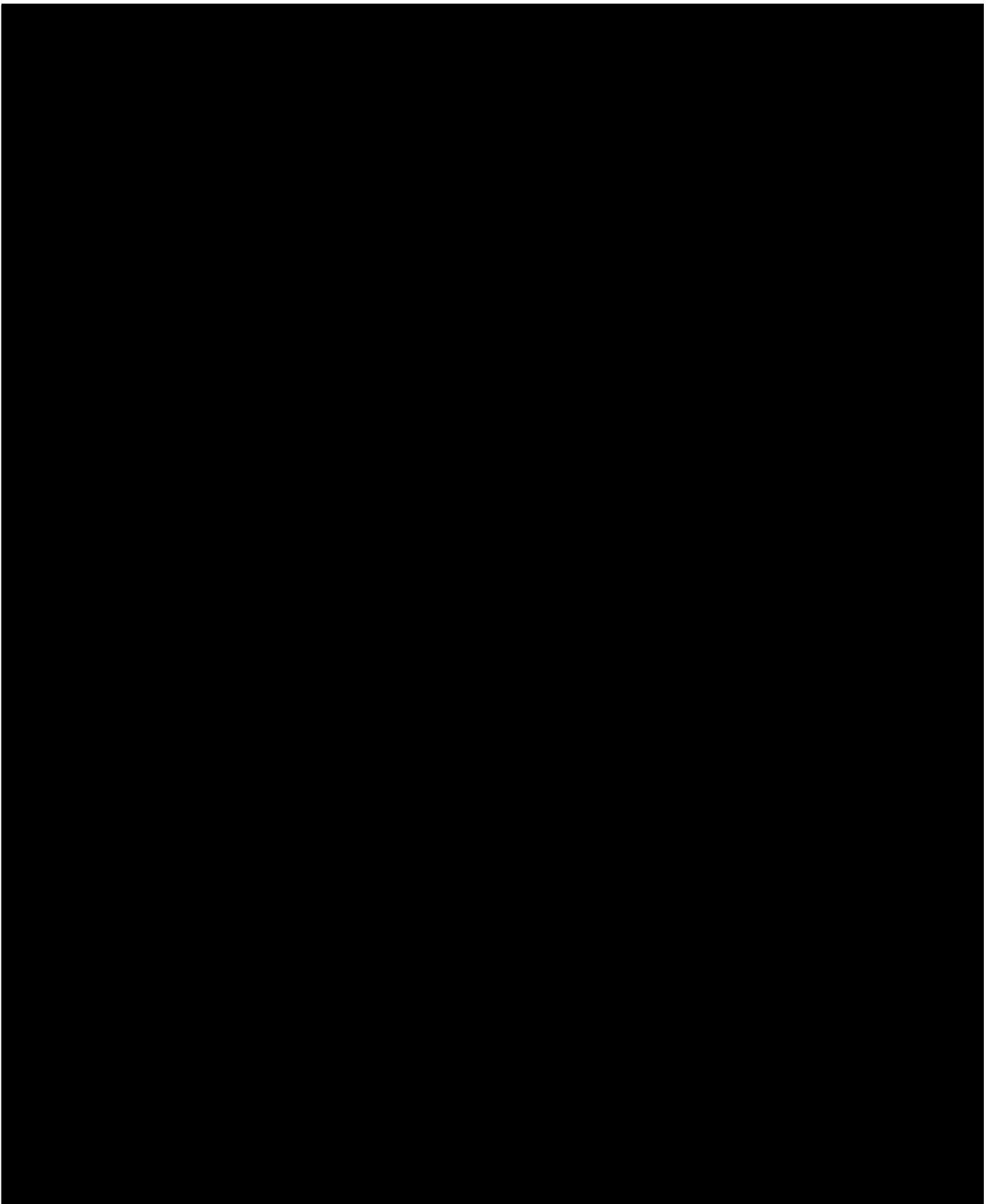


新 R ① JN 安ユ V 00154 B





新 R ① JN 安ユ V 00155 E



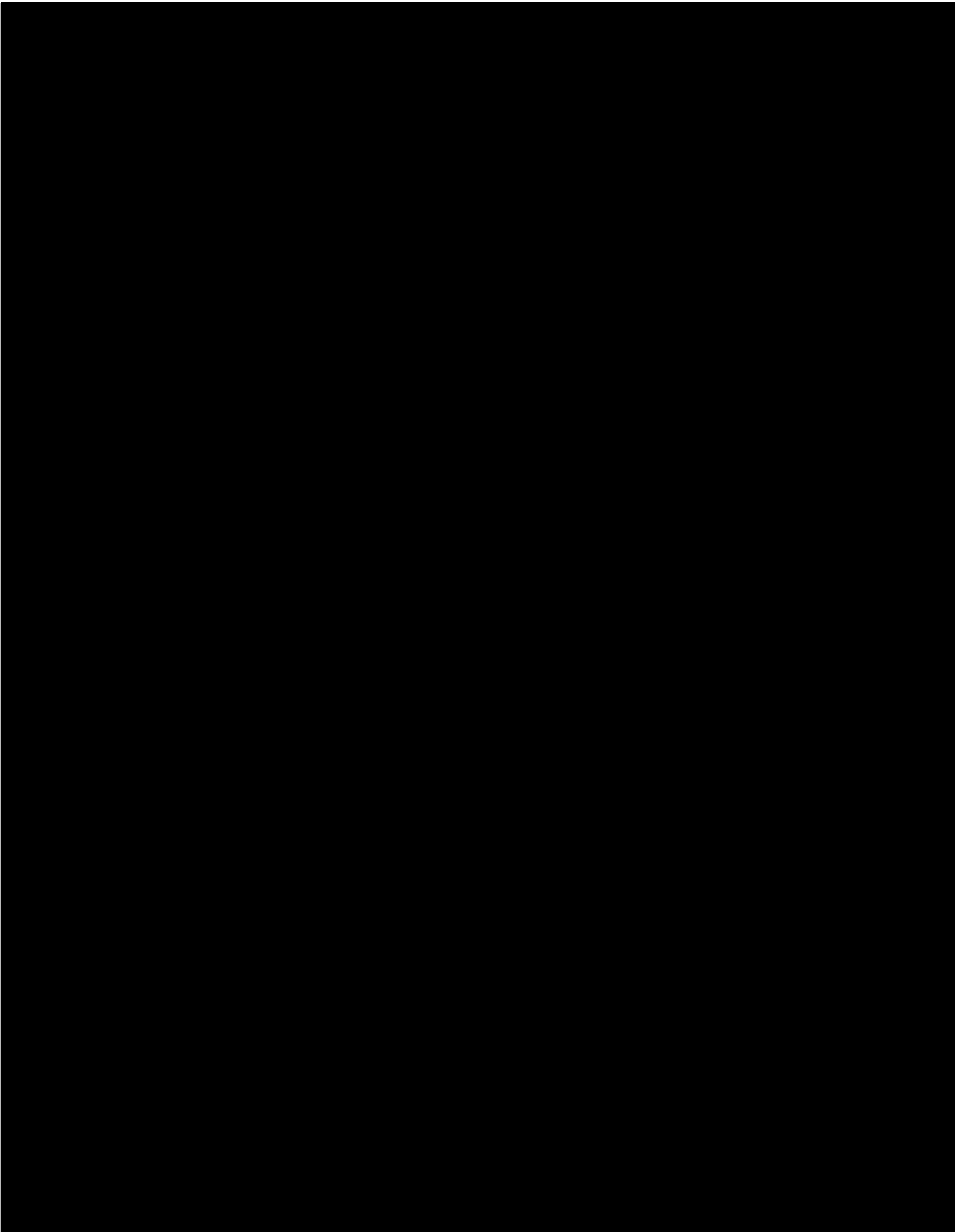
2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005/2007」(社) 日本機械学会 (以下「JSME」という。)
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG4601・補-1984」(社) 日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」(社) 日本電気協会
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」(社) 日本電気協会
- ・「建築物荷重指針・同解説」(社) 日本建築学会(2004)



新 R ① JN 安ユ V 00157 D



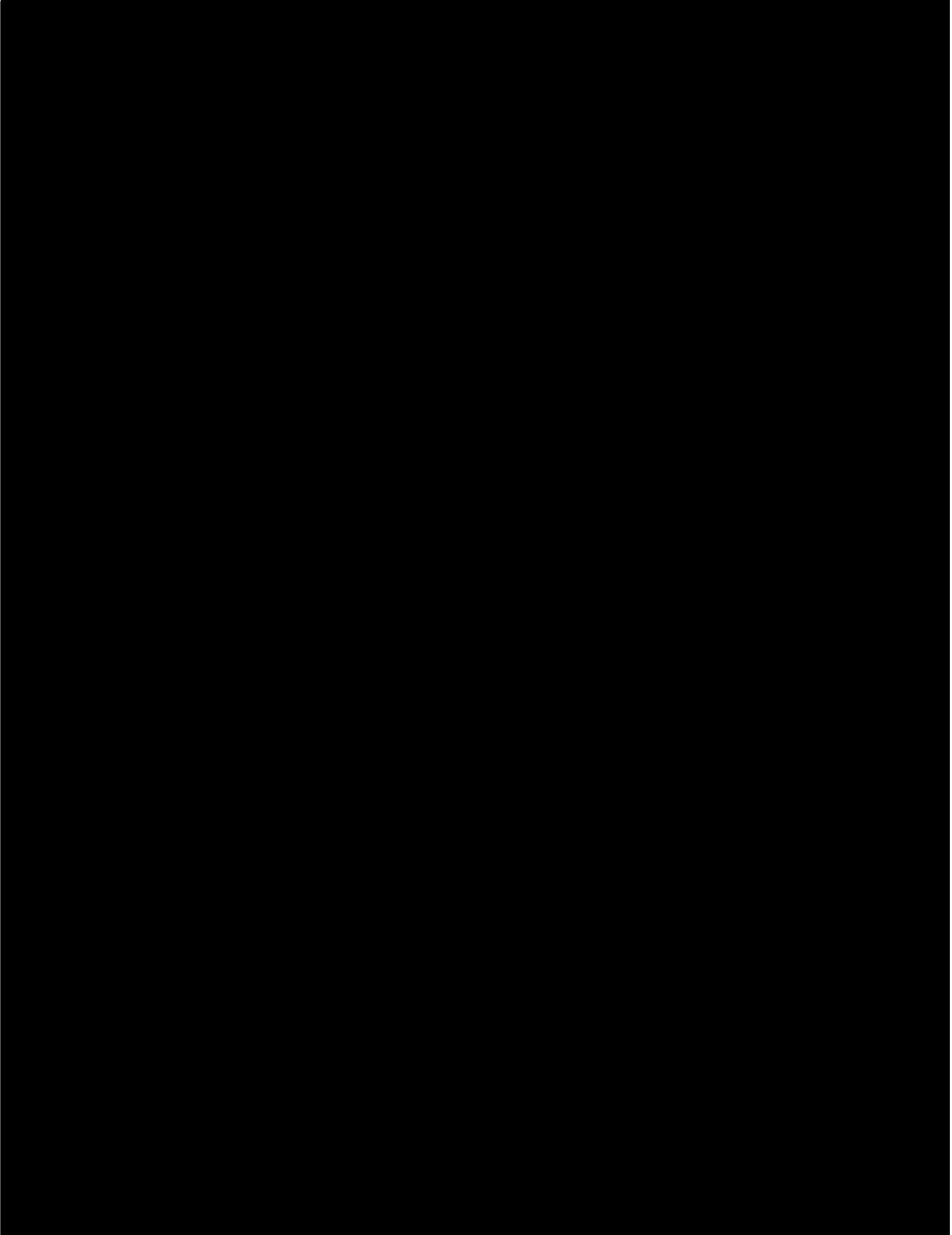


新 R ① JN 安ユ V 00158 C



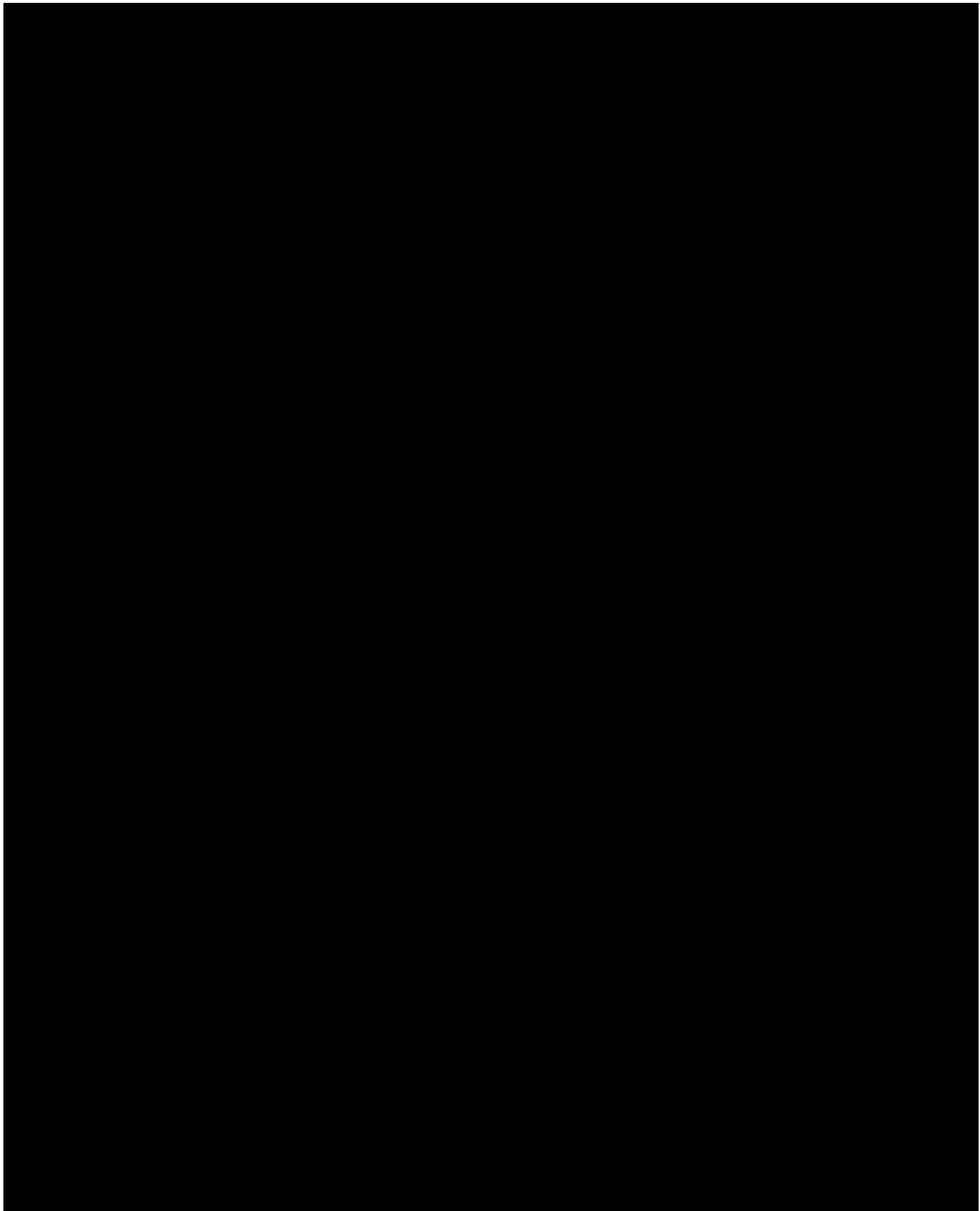


新 R ① JN 安ユ V 00159 D



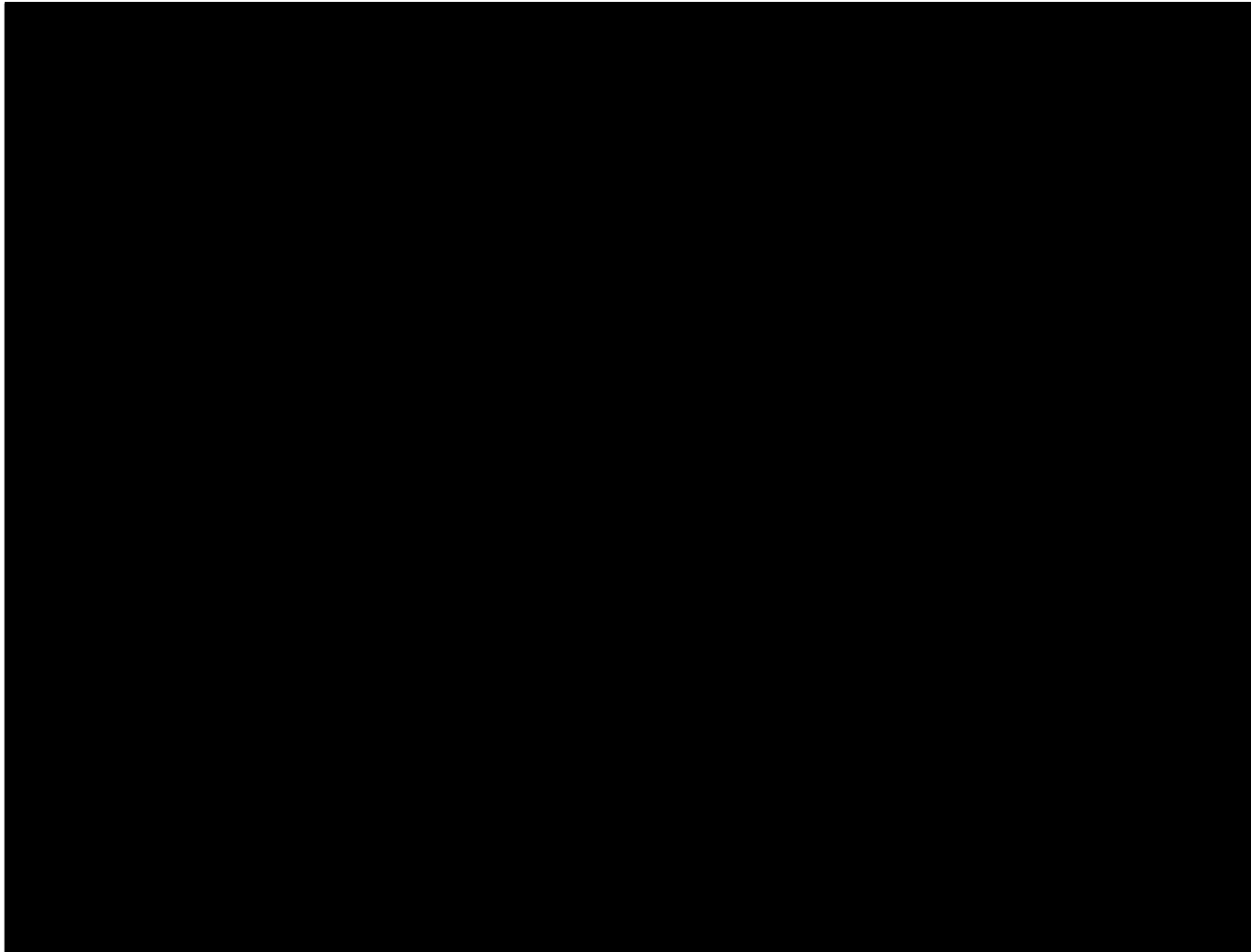


新 R ① IN 安ユ V 00160 F



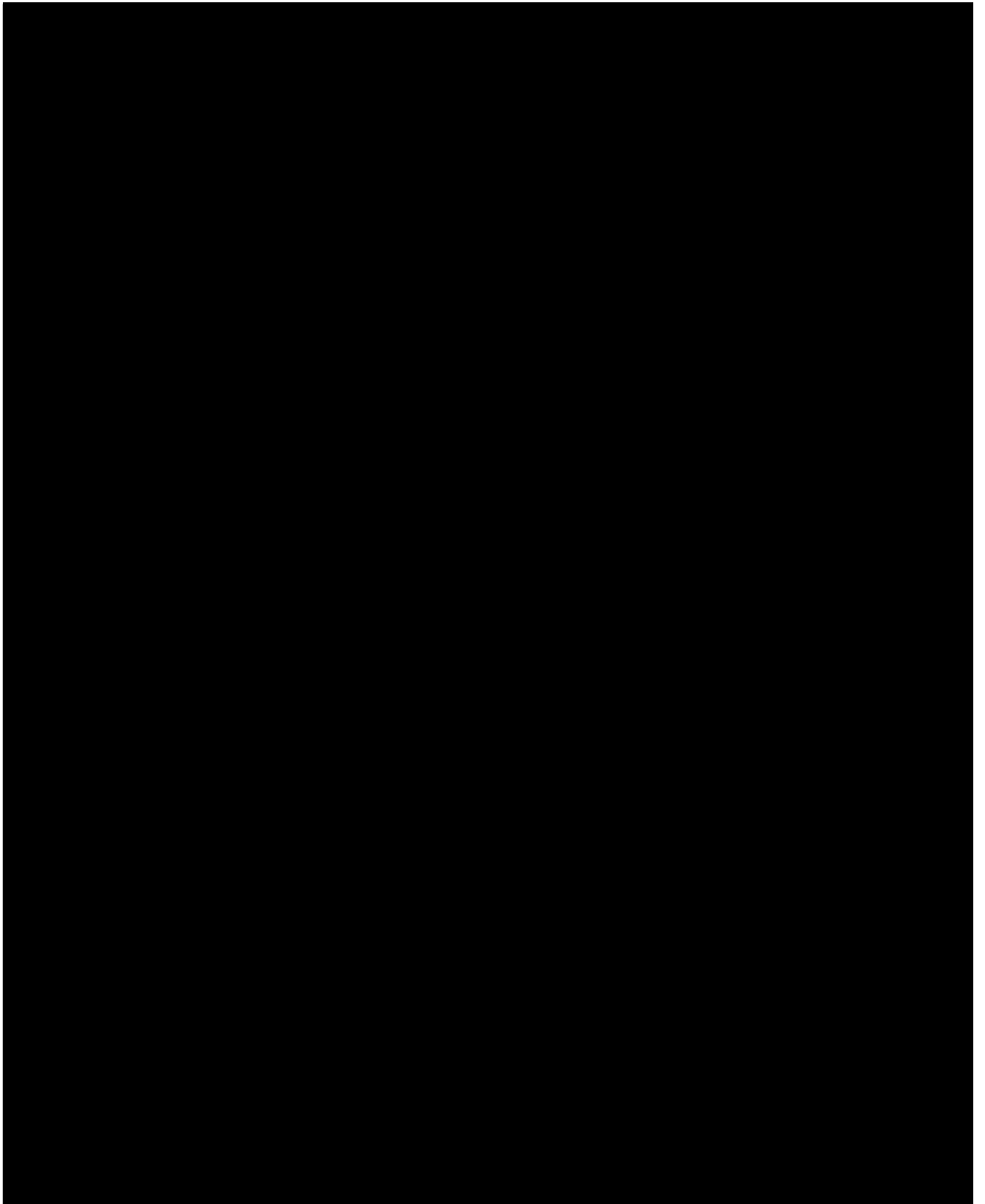


新R① JN 安ユ V 00161 F





新 R ① JN 安ユ V 00162 D

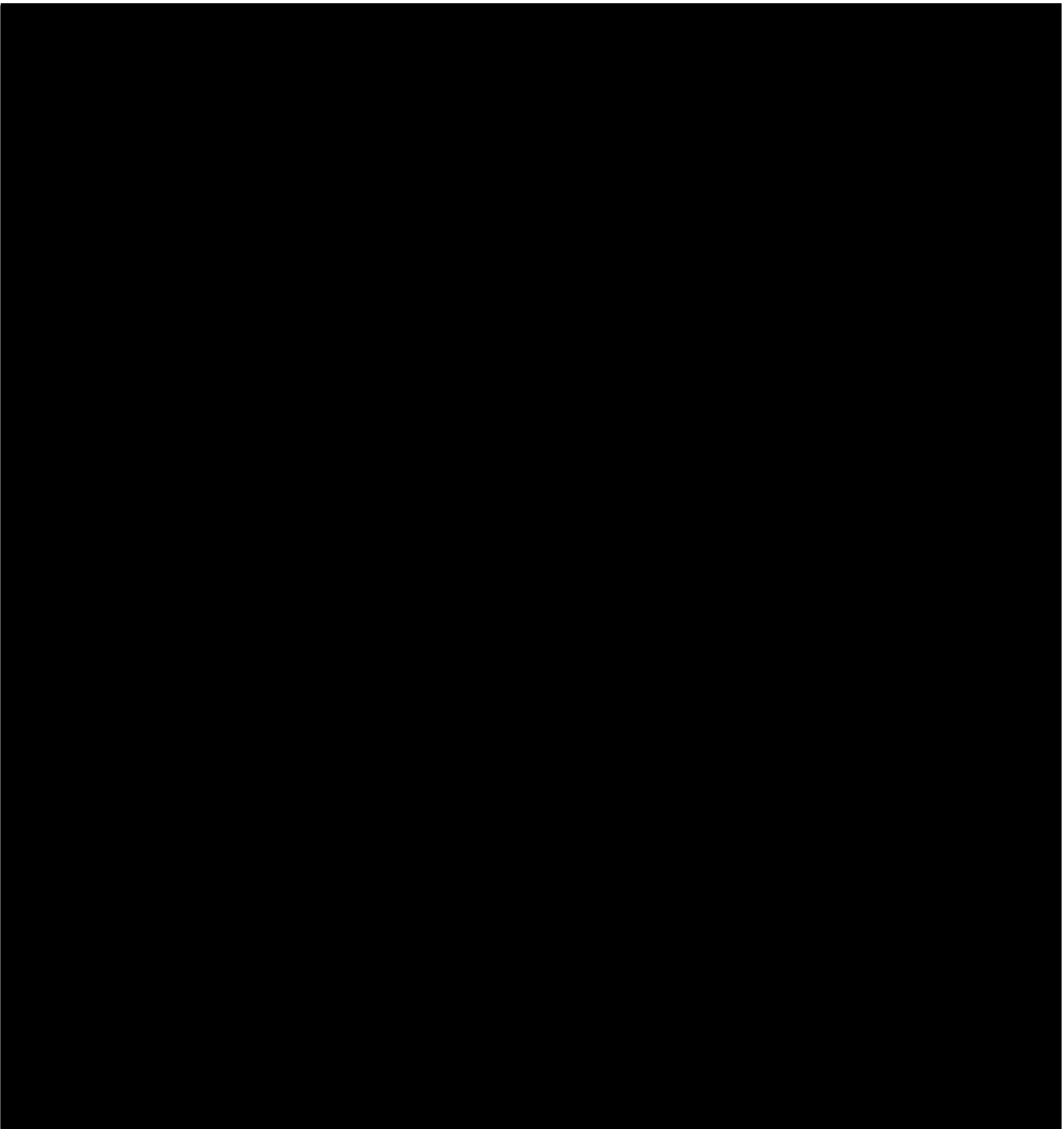


新 R ① JN 安ユ V 00163 D



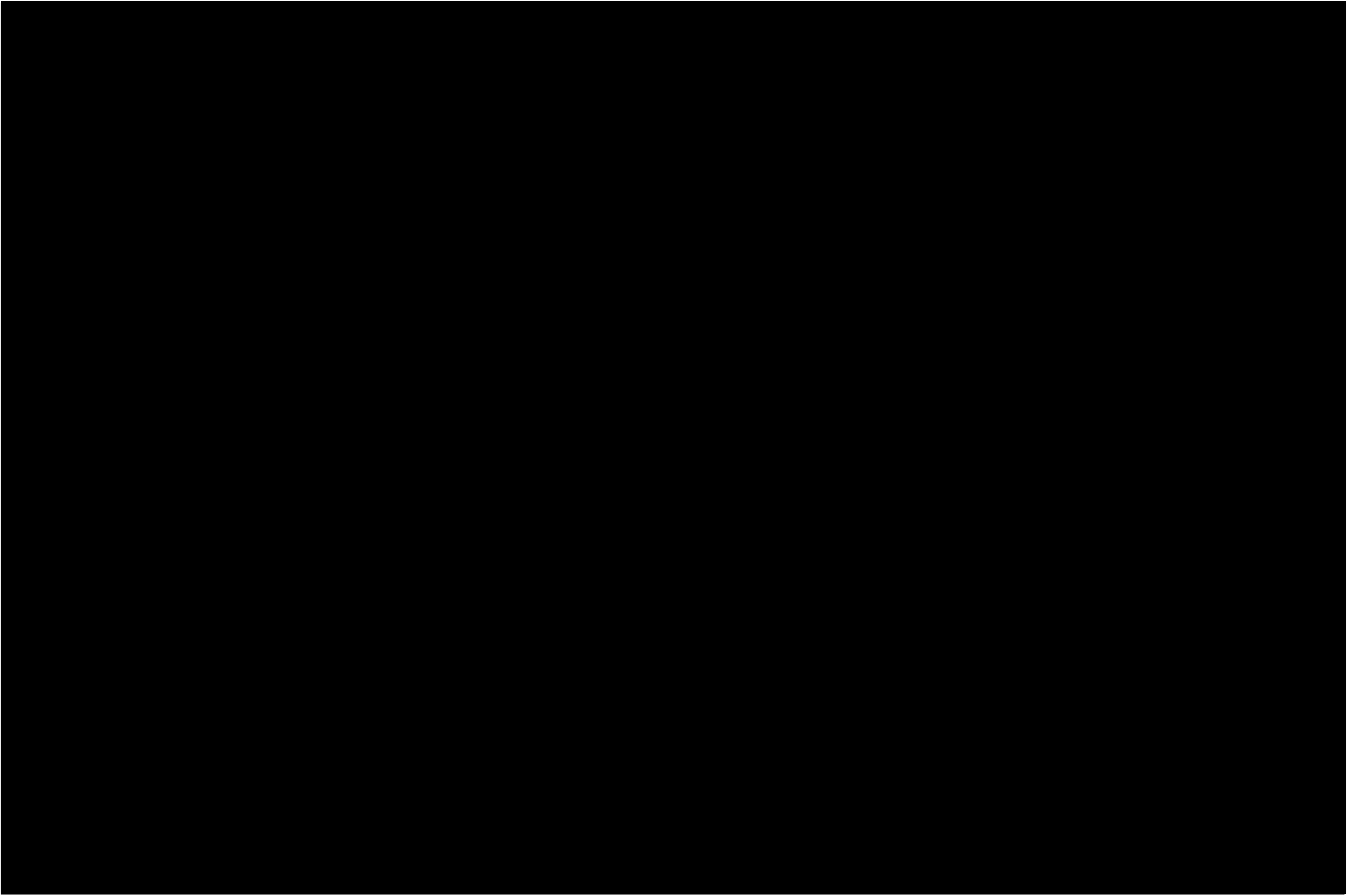


新 R ① JN 安ユ V 00164 E

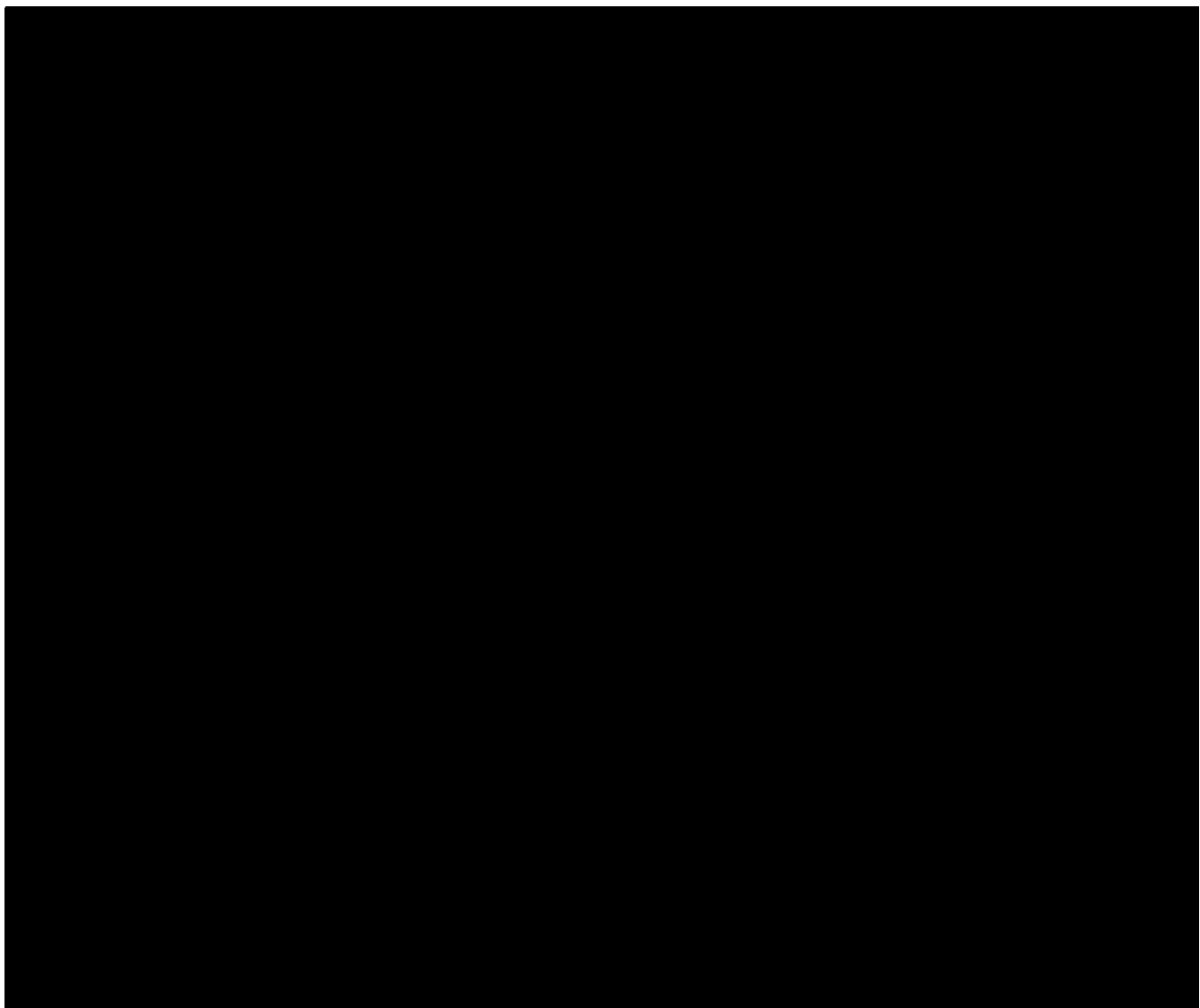




新 R ① .JN 安ユ V 00165 B



新 R ① JN 安ユ V 00166 E



V－別添 1－3 竜巻防護対策設
備の強度計算の方針

目次

1. 概要	1
2. 強度設計の基本方針	1
2.1 対象施設	1
2.2 構造強度の設計方針	2
2.3 荷重及び荷重の組合せ	2
2.4 構造設計	9
2.5 評価方針	11
3. 竜巻防護対策設備の構成要素の設計方針	12
3.1 防護ネットの構造設計	12
3.2 防護板の構造設計	17
3.3 支持架構の構造設計	18
4. 竜巻防護対策設備の構成要素の評価方針	19
4.1 防護ネットの評価方針	20
4.2 防護板の評価方針	23
4.3 支持架構の評価方針	24
5. 許容限界	27
5.1 防護ネットの許容限界	27
5.1.1 許容限界の設定	27
5.1.2 許容限界の設定方法	31
5.2 防護板の許容限界	39
5.2.1 衝突評価	39
5.2.2 許容限界の設定方法	39
5.3 支持架構の許容限界	40
5.3.1 衝突評価	40
5.3.2 部材の支持機能評価	40
5.3.3 支持架構全体の支持機能評価	41
5.3.4 波及的影響評価	41
6. 強度評価方法	42
6.1 防護ネットの強度評価	42
7. 適用規格	63

1. 概要

本資料は、「再処理施設の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という。）第八条に適合する設計とするため、添付書類「VI-1-1-1 再処理施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書」のうち「VI-1-1-1-2 竜巻への配慮に関する説明書」の「IV-1-1-1-2-3 評価対象施設の設計方針」に基づき、竜巻防護対策設備が、設計竜巻に対して要求される強度を有することを確認するための強度評価方針について説明するものである。

2. 強度設計の基本方針

強度評価は、「2.1 強度評価の対象施設」に示す施設を対象として、「2.3 荷重及び荷重の組合せ」で示す設計荷重（竜巻）を考慮し、「6. 強度評価方法」で示す評価方法により、「5. 許容限界」で設定する許容限界を超えない設計とする。

2.1 対象施設

添付書類「VI-1-1-1-2-3 評価対象施設の設計方針」の「3. 要求機能及び性能目標」に基づき、以下の竜巻防護対策設備を対象とする。

- ・安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット

2.2 構造強度の設計方針

竜巻防護対策設備は、事業指定（変更許可）を受けた設計飛来物のうち鋼製材（以下「飛来物」という。）の竜巻防護対象施設への衝突を防止するものであり、添付書類「VI-1-1-1-2-3 評価対象施設の設計方針」の「3.6(3) 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、防護ネット、防護板及び支持架構で構成し、以下の設計とする。

(1) 防護ネット

防護ネットは、竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重（常時作用する荷重、運転時荷重、積雪荷重）を適切に組み合わせた荷重（以下「設計荷重（竜巻）」という。）に対し、主要な部材が破断せず、たわみを生じても、竜巻防護対象施設の機能喪失に至る可能性がある飛来物が竜巻防護対象施設に衝突しないよう捕捉できる設計とする。

(2) 防護板

防護板は、設計荷重（竜巻）に対し、飛来物が竜巻防護対象施設へ衝突することを防止するために、飛来物が防護板を貫通せず、竜巻防護対象施設に波及的影響を与えない設計とする。

(3) 支持架構

支持架構は、設計荷重（竜巻）に対し、飛来物が竜巻防護対象施設へ衝突することを防止するために、飛来物が支持架構を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載する防護ネット及び防護板を支持する機能を維持可能な構造強度を有し、竜巻防護対象施設に波及的影響を与えないために、支持架構を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする。

2.3 荷重及び荷重の組合せ

竜巻防護対策設備の強度評価にて考慮する荷重及び荷重の組合せは、以下のとおり設定する。

(1) 荷重の種類

a. 常時作用する荷重（D）

常時作用する荷重は、持続的に生じる荷重である。

b. 設計竜巻による荷重（F_T）

設計竜巻（最大風速100 m/s）による荷重は、設計竜巻の特性を踏まえ、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び飛来物による衝撃荷重とする。設計竜巻の特性値を第2.3-1表に示す。

・設計竜巻の移動速度（V_T）

$$V_T = 0.15 \cdot V_D$$

・設計竜巻の最大接線風速（V_{RM}）

$$V_{RM} = V_D - V_T$$

・設計竜巻の最大気圧低下量（ΔP_{max}）

$$\Delta P_{max} = \rho \cdot V_{RM}^2$$

第2.3-1表 設計竜巻の特性値

最大風速 V _D (m/s)	移動速度 V _T (m/s)	最大接線風速 V _{RM} (m/s)	最大気圧低下量 ΔP _{max} (N/m ²)
100	15	85	8900

(a) 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重は、設計竜巻の最大風速による荷重である。

竜巻の最大風速は、一般的には水平方向の風速として算出されるが、鉛直方向の風圧力に対して脆弱と考えられる竜巻防護対策設備が存在する場合には、鉛直方向の最大風速等に基づいて算出した鉛直方向の風圧力についても考慮する。

風圧力による荷重は、設備の形状により変化するため、設備の部位ごとに異なる。そのため、各設備及び評価対象部位に対して厳しくなる方向からの風を想定し、各設備の部位ごとに荷重を設定する。

ガスト影響係数 (G) は、設計竜巻の風速が最大瞬間風速をベースとしていること等から設備の形状によらず「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」(平成25年6月19日 原規技発第13061911号 原子力規制委員会決定) (以下「竜巻ガイド」という。)を参照して、 $G=1.0$ とする。空気密度 (ρ) は「建築物荷重指針・同解説 (2015改定)」より $\rho=1.22 \text{ kg/m}^3$ とする。

設計用速度圧 (q) については、設備の形状によらず $q=6100 \text{ N/m}^2$ とする。

(b) 気圧差による荷重 (W_p)

外気と隔離されている区画の境界部など、気圧差による圧力影響を受ける設備の建屋壁、屋根等においては、設計竜巻による気圧低下によって生じる設備等の内外の気圧差による荷重が発生する。閉じた設備 (通気がない設備) については、この圧力差により閉じた設備の隔壁に外向きに作用する圧力が生じるとみなし、気圧差による荷重を設定することを基本としているが、竜巻防護対策設備は外気と通じており、設備の外殻に面する部材に気圧差は生じないことから考慮しない。

(c) 飛来物による衝撃荷重 (W_M)

衝突による影響が大きくなる向きで飛来物が竜巻防護対策設備に衝突した場合の衝撃荷重を算出する。

衝突評価においても、飛来物の衝突による影響が大きくなる向きで衝突することを考慮して評価を行う。

飛来物の飛来速度及び諸元を第2.3-2表に示す。

衝撃荷重については、竜巻防護対策設備への影響が大きい鋼製材を考慮する。

第2.3-2表 飛来物の諸元 (設計飛来物)

飛来物の種類	鋼製材	鋼製パイプ
寸法 (m)	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2	長さ×直径 2.0×0.05
質量 (kg)	135	8.4
最大水平速度 (m/s)	51	49
最大鉛直速度 (m/s)	34	33

c. 運転時荷重 (F_p)

運転時の状態で作用する荷重は、竜巻防護対策設備には作用しないため考慮しない。

d. 積雪荷重 (L_s)

積雪荷重は、添付書類「VI-1-1-1-1-1 再処理施設の自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」の「4.1(3)b. 竜巻荷重と積雪荷重の組合せ」に示すとおり、六ヶ所村統計書における観測記録上の極値190cmに、「建築基準法施行令」第八十二条に定める建築基準法の多雪区域における積雪荷重と地震荷重の組合せを適用して、平均的な積雪荷重を与えるための係数0.35を考慮した荷重とする。

(2) 荷重の組合せ

評価対象施設の設計に用いる竜巻の荷重は、気圧差による荷重 (W_P) を考慮した複合荷重 (W_{T1})、並びに設計竜巻の風圧力による荷重 (W_W)、気圧差による荷重 (W_P) 及び飛来物による衝撃荷重 (W_M) を組み合わせた複合荷重 (W_{T2}) を以下のとおり設定する。

$$W_{T1} = W_P$$

$$W_{T2} = W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M$$

評価対象施設には W_{T1} 及び W_{T2} の両荷重をそれぞれ作用させる。各施設の設計竜巻による荷重の組合せについては、施設の設置状況及び構造を踏まえ適切な組合せを設定する。竜巻防護対策設備の構成要素別の荷重の組合せを第2.3-3表に示す。

第2.3-3表 竜巻防護対策設備の構成要素別の荷重の組合せ

分類	評価対象施設	強度設計の対象設備		評価内容	荷重					
					常時作用する荷重		風圧力による荷重	気圧差による荷重 (注1)	飛来物による荷重	運転荷重
					自重	上載荷重				
竜巻防護対策設備	飛来物防護ネット	防護ネット	上面	構造強度	○	○ (注2)	○	—	○	—
			側面		○	—	○	—	○	—
		防護板		構造強度	—	—	—	—	○	—
		支持架構		構造強度	○	○ (注3)	○	—	○	—

(注1)：外気と通じている竜巻防護対策設備には、気圧差は生じない。

(注2)：積雪荷重を考慮する。

(注3)：防護ネット及び防護板の自重、並びに積雪荷重を考慮する。

(3) 荷重の算定方法

「(1) 荷重の種類」で設定している荷重の算出式を以下に示す。

a. 防護ネット

(a) 記号の定義

防護ネットの部材の評価における荷重算出に用いる記号を、第2.3-4表に示す。

第2.3-4表 防護ネットの部材の評価における荷重算出に用いる記号

記号	単位	定義
C	—	風力係数（施設の形状や風圧力が作用する部位（屋根、壁等）に応じて設定する。）
d	m	飛来物衝突後の設計飛来物の移動距離
E _f	kJ	飛来物衝突時にネットに作用するエネルギー
F _a	kN	飛来物衝突時にネットが受ける最大衝撃荷重
F _a ''	kN	飛来物衝突時にネットが受ける衝撃荷重
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度（g=9.80665）
L _x	m	ネット展開方向の実寸法
L _y	m	ネット展開直角方向の実寸法
m	kg	飛来物の質量
n	—	主金網の枚数
P _w	kN	ネットの自重により作用する荷重
Q	kN/s	衝撃荷重が時間とともに比例する際の比例係数
q	N/mm ²	設計用速度圧
t	s	時間
t ₁	s	飛来物が衝突しネットのたわみ量が最大になる時間
V _D	m/s	設計竜巻の最大風速
W _w	kN	風圧力による荷重
δ	m	飛来物衝突時のネットの最大たわみ量
ρ	kg/m ³	空気密度
φ	—	ネットの充実率

(b) 自重による荷重の算出

飛来物防護ネットに常時作用する荷重として、自重を考慮する。
防護ネットにおいては、自重による荷重P_wは、

$$P_w = \frac{A_a \cdot m_N \cdot g \cdot (n+1)}{1000}$$

と算出される。

A_aはネットの実寸法L_x、L_yを用いて、以下の式で求められる。

$$A_a = L_x \cdot L_y$$

(c) 竜巻による荷重の算出

イ. 風圧力による荷重

風圧力による荷重は、竜巻の最大風速による荷重であり、竜巻ガイドを参考に次式のとおり算出する。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

ここで、

$$q = 0.5 \cdot \rho \cdot V_D^2$$

防護ネットにおいては、ネットの充実率をφとすると、風圧力による荷重を受けるネットの受圧面積Aは次式の通りとなる。

$$A = \phi \cdot A_a$$

(d) 飛来物による衝撃荷重の算出

ネットにおいて、飛来物の衝突時に受ける衝撃荷重F_a''は時間とともに比例して増加すると仮定すると、F_a''は以下のとおり算出される。

$$F_a'' = Q \cdot t \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

したがって、ネットへの衝突後の飛来物の移動速度Vは、(2.1)式の衝撃荷重F_a” から、以下のとおり算出される。

$$V = -\frac{1}{m} \int_0^t F_a'' dt$$

$$= -\frac{Q \cdot t^2}{2 \cdot m} + V_1 \dots\dots\dots (2.2)$$

さらに、ネットへの衝突後の飛来物の移動距離dは、(2.2)式の数値Vから以下のとおり算出される。

$$d = \int_0^t V dt$$

$$= -\frac{Q \cdot t^3}{6 \cdot m} + V_1 \cdot t \dots\dots\dots (2.3)$$

飛来物が衝突しネットのたわみが最大になる時間t₁におけるネットの最大変位δは、飛来物の速度はV=0であるから、(2.2)式及び(2.3)式より、

$$Q \cdot t_1^2 = 2 \cdot m \cdot V_1 \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\delta = -\frac{Q \cdot t_1^3}{6 \cdot m} + V_1 \cdot t_1$$

上記2式を連立し、

$$\delta = \frac{2}{3} \cdot V_1 \cdot t_1$$

よって、

$$t_1 = \frac{3 \cdot \delta}{2 \cdot V_1} \dots\dots\dots (2.5)$$

以上より、時間t₁における飛来物による衝撃荷重F_aは(2.1)式及び(2.4)式より、

$$F_a = \frac{2 \cdot m \cdot V_1}{t_1}$$

さらに、(2.5)式と連立し、

$$F_a = \frac{4 \cdot m \cdot V_1^2}{3 \cdot \delta} \dots\dots\dots (2.6)$$

また、時間t₁における飛来物の衝突によりネットに作用するエネルギーE_fは、衝突時の飛来物の運動エネルギーとして、以下より求められる。

$$E_f = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_1^2 \dots\dots\dots (2.7)$$

したがって、(2.6)式及び(2.7)式より、

$$F_a = \frac{8 \cdot E_f}{3 \cdot \delta} \dots\dots\dots (2.8)$$

(2.8)式に、たわみ評価で算出する、飛来物が衝突する場合のネットの最大たわみ量δを代入し、F_aを算出する。

2.4 構造設計

竜巻防護対策設備は、「2.2 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及び「2.3 荷重及び荷重の組合せ」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

(1) 防護ネット

防護ネットは、ネット、ワイヤロープ、ターンバックル、シャックル、接続用の治具（隅角部固定ボルト及び取付プレート）、取付金物または鋼製枠から構成され、支持架構に取り付けられる。

防護ネットのうちネットは、ネット端部の網目を縫うようにはわせたワイヤロープにより支持し、ワイヤロープは支持架構または鋼製枠の四隅に設置した接続用の治具にて支持する。ワイヤロープ端部は、ターンバックル又はシャックルに接続した上で、ターンバックル又はシャックルを支持架構または鋼製枠に設置した取付プレートに接続する。

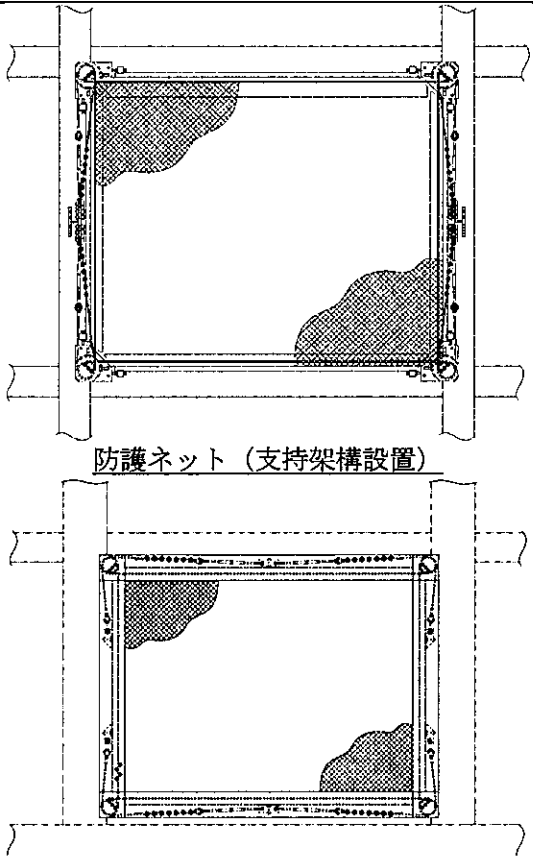
防護ネットは、ネットに作用する自重、積雪荷重、飛来物による衝撃荷重及び風圧力による荷重をワイヤロープ、ターンバックル、シャックル及び接続用の治具を介して、取付金物または鋼製枠から支持架構に伝達する。

防護ネットのうちネットは、飛来物が衝突した際に局部的に生じる衝撃荷重に耐え、変形することにより飛来物の持つ運動エネルギーを吸収し、竜巻防護対象施設への衝突を防止するものである。ネットは、らせん状の硬鋼線を三次元的に編み込み、編み込みの方向によって主に荷重を受け持つ展開方向と展開直角方向の異方性を持っており、ネットに対してL字に張った2本のワイヤロープで支持される。

ワイヤロープは、ネット展開方向と平行に配置されるワイヤロープと、ネット展開直角方向に配置されるワイヤロープが接合されていることから、ワイヤロープの張力が均一に発生する構造となっており、ワイヤロープはネットの四隅の接続用の治具で支持される。また、ワイヤロープは、ネットの自重による平常時のたわみが大きくなるように、初期張力をかけ、トルク管理を行う。また、ネットは2枚以上重ねて敷設するため、それぞれのネットの機能が発揮されるよう、ワイヤロープや接続用の治具等はネットごとに同じ構成にて設置する。なお、ネット目合い寸法50mmのネットを2枚設置するため、鋼製パイプはすり抜けることはないが、鋼製パイプよりも小さい飛来物のすり抜け低減対策として、念のためにネット2枚の上部に目合い寸法40mmのネット（補助ネット）を1枚取り付ける。

防護ネットの概要を第2.4-1表に示す。

表2.4-1表 防護ネットの構造計画

設備名称	計画の概要		説明図
	主要構造	支持構造	
防護ネット	<p>ネット、ワイヤロープ、ターンバックル、シャックル、接続用の治具（隅角部固定ボルト及び取付プレート）、取付金物または鋼製枠から構成する。</p>	<p>ボルトを用いて支持架構により支持し、支持架構を介して荷重を基礎に伝達する構造とする。</p>	 <p>防護ネット (支持架構設置)</p> <p>防護ネット (鋼製枠設置)</p>

新R ① JN 火G V 00212 C

2.5 評価方針

竜巻防護対策設備の強度評価は、「2.4 構造設計」を踏まえ、以下の評価方針とする。

(1) 防護ネット

設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、主要な部材が破断しなければ飛来物は捕捉可能であり、飛来物が竜巻防護対象施設と衝突しない。したがって、防護ネットのうちネット、ワイヤロープ及び接統治具（支持部及び固定部）に破断が生じないように十分な余裕を持った強度を有することを、計算により確認する。

また、設計竜巻の風圧力による荷重及び飛来物による衝撃荷重に対し、竜巻防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物が竜巻防護対象施設と衝突しないよう捕捉するために、防護ネットのうちネット及びワイヤロープにたわみを生じても、竜巻防護対象施設との離隔を確保できることを計算により確認する。

(2) 防護板

飛来物による衝撃荷重に対し、飛来物が竜巻防護対象施設に衝突することを防止するために、飛来物が防護板を貫通しないことを確認する。

(3) 支持架構

設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物が竜巻防護対象施設に衝突することを防止するために、支持架構に対し、飛来物が貫通しないことを解析により確認する。

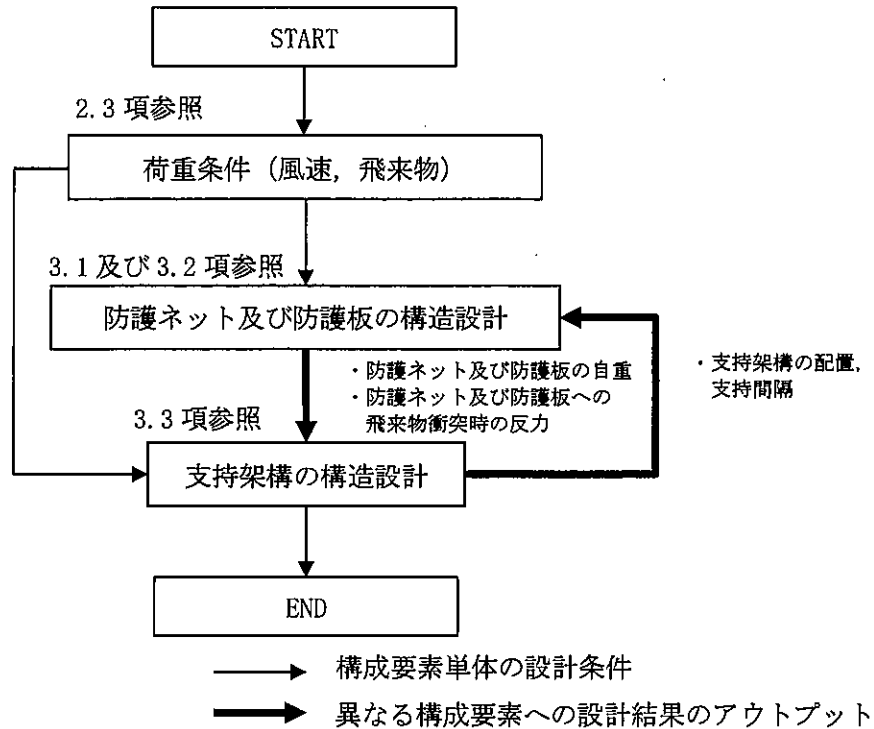
また、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、支持架構に設備の倒壊に至るような変形が生じないことを計算により確認する。

さらに、竜巻防護対象施設に波及的影響を与えないよう、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、支持架構全体が倒壊を生じないことを計算により確認する。

3. 竜巻防護対策設備の構成要素の設計方針

竜巻防護対策設備は、「2.2 構造強度の設計方針」に基づき、「2.4 構造設計」に示した構造と、「2.3 荷重及び荷重の組合せ」で設定した荷重を踏まえ、竜巻防護対策設備を構成する要素間での荷重の受け渡し、要素ごとの設計及び設計結果の全体設計へ反映を行う。

竜巻防護対策設備の設計フローを第3.-1図に示す。

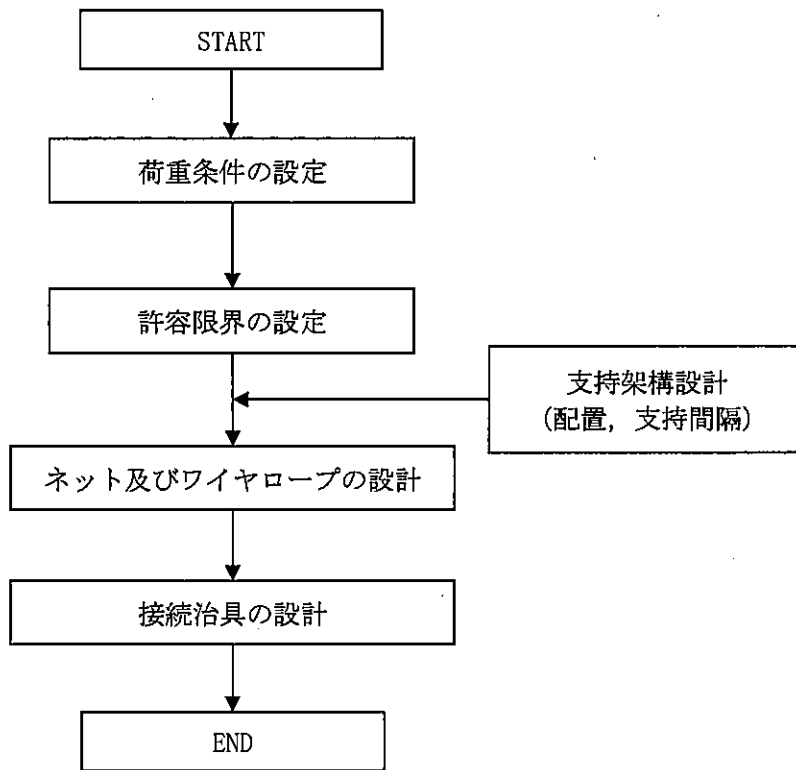


第3.-1図 竜巻防護対策設備の設計フロー

3.1 防護ネットの構造設計

「2.2 構造強度の設計方針」に基づき、竜巻防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物のうち、その影響が飛来物以下となるものが竜巻防護対象施設へ衝突することを防止可能な設計とするため、飛来物の防護ネットへの衝突に対し、主要な部材が破断することなく支持架構に荷重を伝達し、たわみを生じて、飛来物が竜巻防護対象施設と衝突しないよう、飛来物防護ネットで捕捉できる設計とする。

防護ネットの設計フローを第3.1-1図に示す。



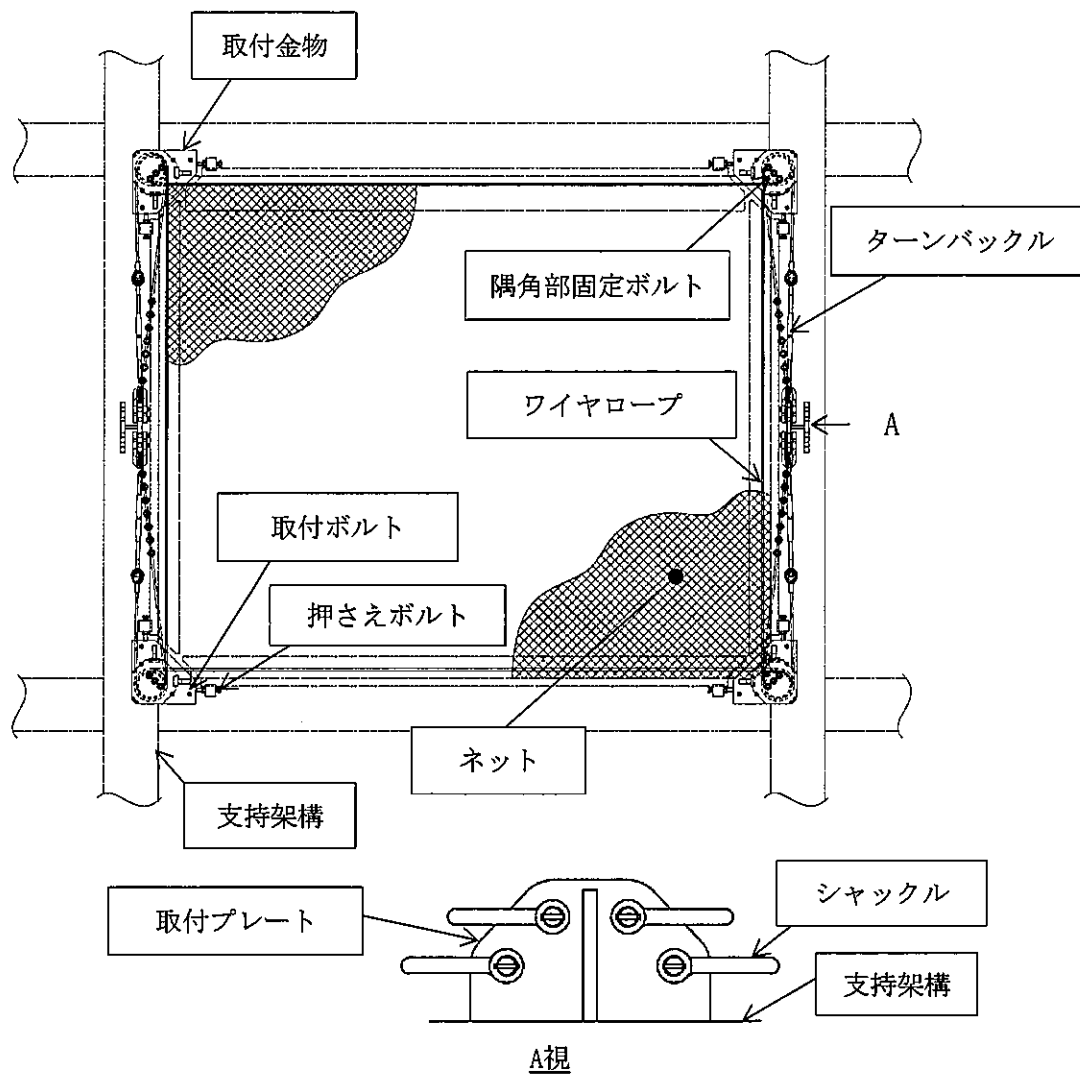
第3.1-1図 防護ネットの設計フロー

防護ネットの概要図を第3.1-2図及び第3.1-3図に示す。ネット、ワイヤロープ、接続治具（支持部及び固定部）、並びに取付金物または鋼製枠から構成され、ネットの4辺をワイヤロープにより支持し、ワイヤロープは鋼製枠に設置した接続治具にて支持する構造とする。ワイヤロープの端部はターンバックルまたはシャックルを設置し、ターンバックルまたはシャックルを、支持架構または鋼製枠に設置した取付けプレートに接続する構造とする。

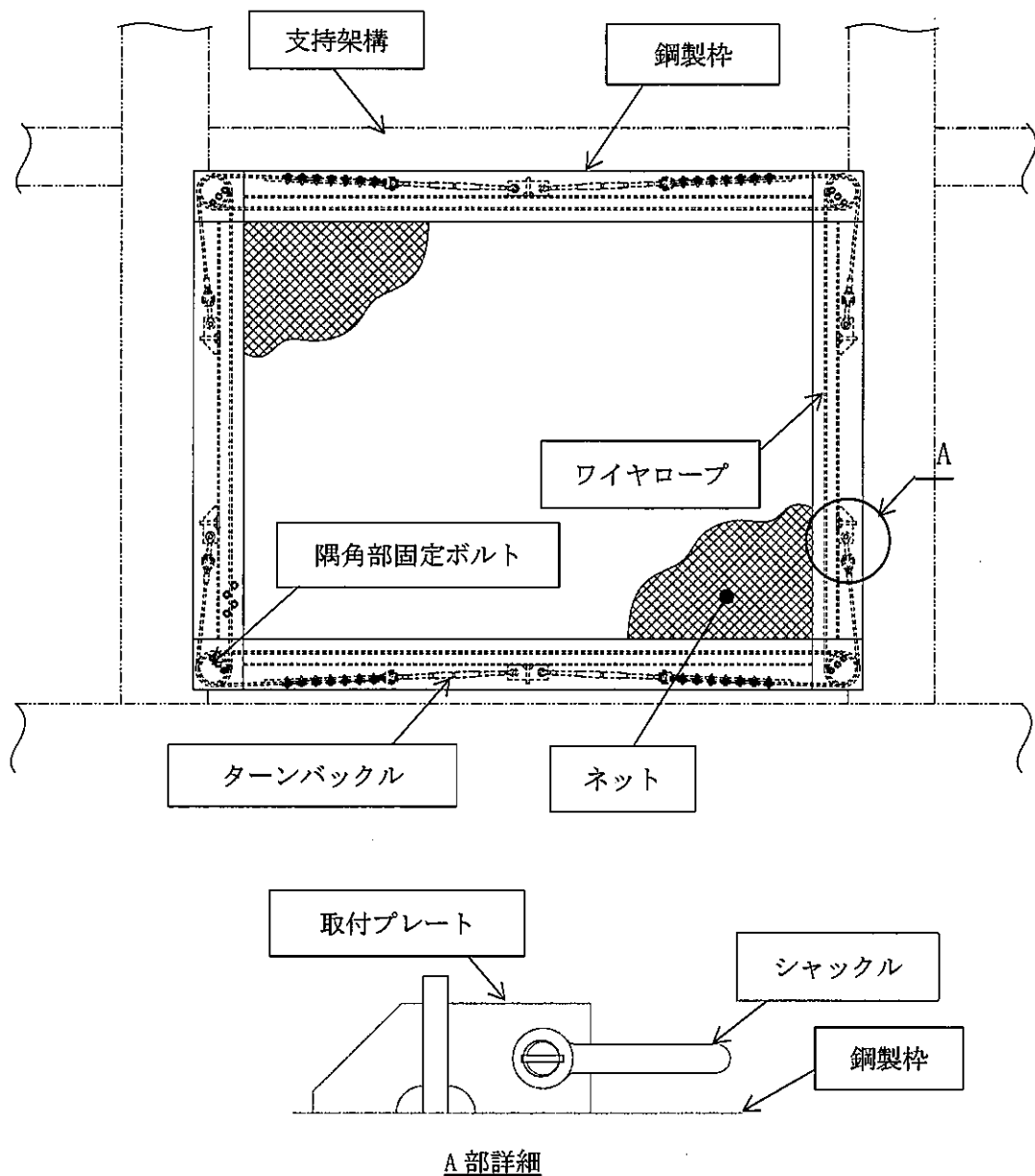
防護ネットは、50mm目合いのネット2枚及び40mm目合いのネット1枚で構成する。

防護ネットは、電力中央研究所報告書「高強度金網を用いた竜巻飛来物対策工の合理的な衝撃応答評価手法」（総合報告：O01）（以下「電中研報告書」という。）にて適用性が確認されている評価式及びネットの物性値を用いた構造とする。

飛来物防護ネットを構成するネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）についての構造設計を以下に示す。



第3.1-2図 防護ネットの概要図 (支持架構設置)



第3.1-3図 防護ネットの概要図（鋼製枠設置）

(1) ネット

ネットは、らせん状の硬鋼線を山形に折り曲げて列線とし、3次的に交差させて編み込んだものであり、編み込みの向きにより、展開方向とその直角方向の異方性を有する。展開方向が主に荷重を受け持ち、展開方向と展開直角方向で剛性や伸び量が異なるため、これらの異方性を考慮した設計とする。ネットは、電中研報告書において、その剛性、最大たわみ時のたわみ角、1目合いの破断変位等が確認されている。

ネットの寸法は、支持架構の柱及び梁の間隔並びにネットの展開方向と展開直角方向の剛性や伸び量の異方性を考慮して、展開方向と展開直角方向の寸法の比（以下「アスペクト比」という。）について、電中研報告書にて適用性が確認されている範囲（1:1~2:1）に入るように設計する。

(2) ワイヤロープ

ワイヤロープの取付部は、展開方向のワイヤロープと展開直角方向のワイヤロープで荷重の伝達分布が異なり、さらにワイヤロープの巻き方によりワイヤロープ間の荷重伝達に影響を及ぼす可能性があるため、ネットに対して2本をL字に設置することにより、ワイヤロープに作用する荷重が均一となるような設計とする。

(3) 接続治具（支持部及び固定部）

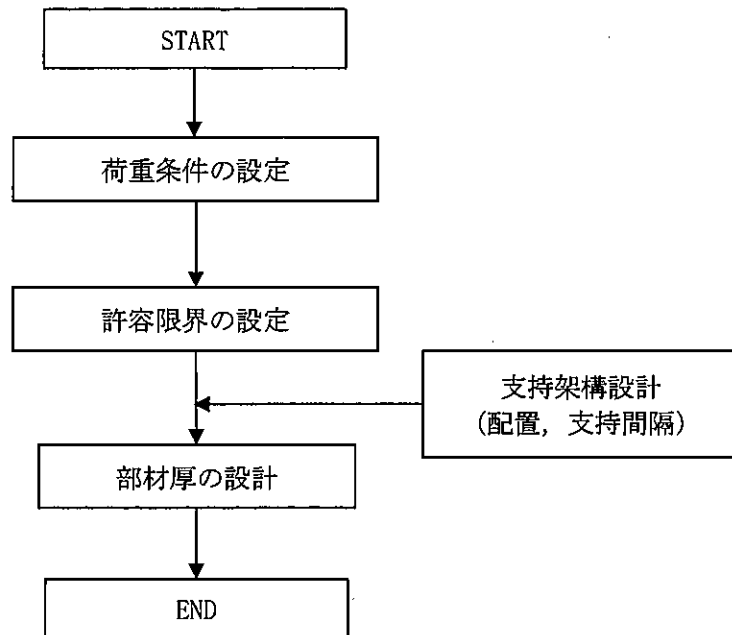
接続治具は、電中研報告書の評価式を適用するため、衝突試験における試験体と同じ構造を採用しており、飛来物衝突時に急激な大荷重が作用するのを抑制するために、緩衝装置を四隅に設置する設計とする。

接続治具は、ネットへの飛来物の衝突によりネットからワイヤロープを介して直接作用する荷重若しくは発生する応力に対して、破断することのない強度を有する設計とする。接続治具（支持部）はワイヤロープを支持するターンバックル及びシャックルであり、接続治具（固定部）は隅角部固定ボルト及びターンバックルまたはシャックルを、支持架構または鋼製枠に接続する取付けプレートである。

3.2 防護板の構造設計

「2.2 構造強度の設計方針」に基づき、竜巻防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物のうち、その影響が飛来物以下となるものが竜巻防護対象施設へ衝突することを防止可能な設計とするため、飛来物の防護板への衝突に対し、防護板が貫通することなく支持架構に荷重を伝達し、飛来物が竜巻防護対象施設と衝突しないよう、飛来物防護板で捕捉できる設計とする。

飛来物防護板の設計フローを第3.2-1図に示す。

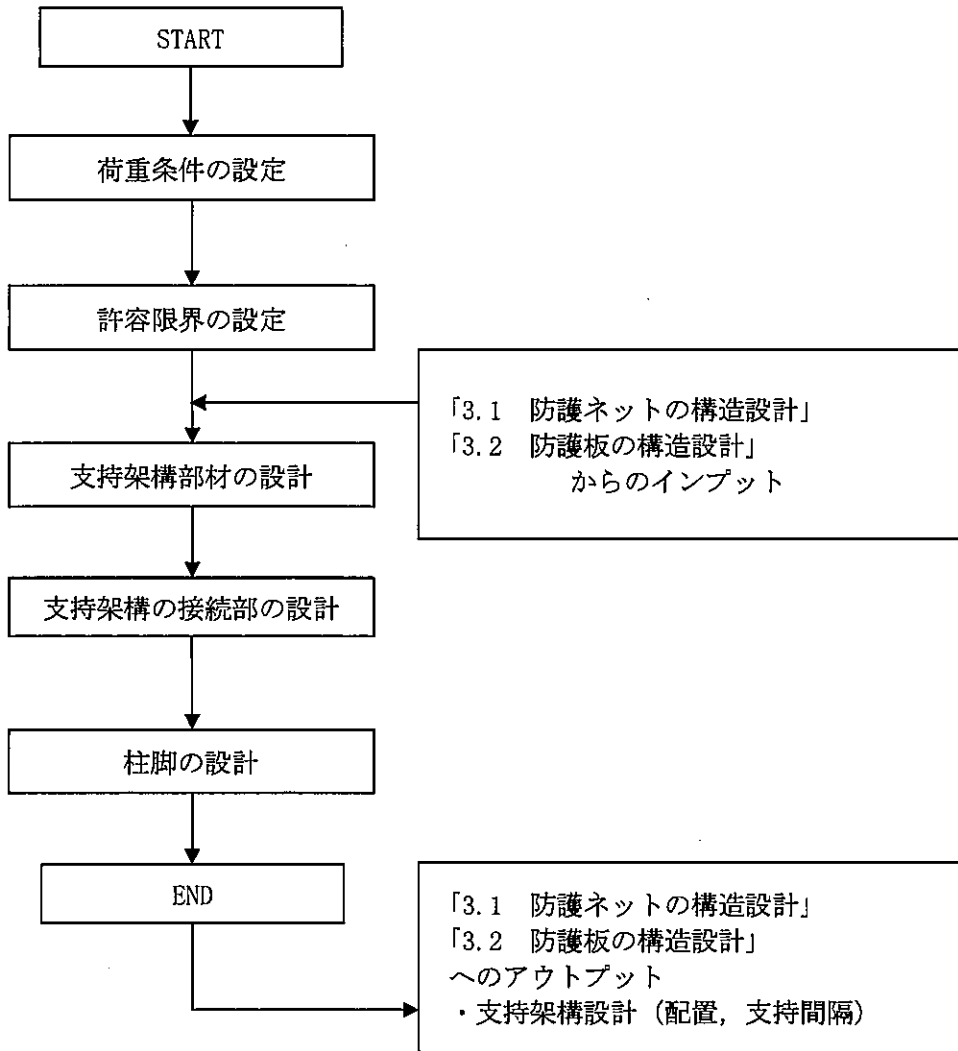


第3.2-1図 防護板の設計フロー

3.3 支持架構の構造設計

「2.2 構造強度の設計方針」に基づき、竜巻防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物のうち、その影響が飛来物以下となるものが竜巻防護対象施設へ衝突することを防止可能な設計とするため、飛来物が支持架構を構成する主要な構造部材を貫通せず、上載する防護ネット及び防護板を支持する機能を維持可能な構造強度を有する設計とする。

支持架構の設計フローを第3.3-1図に示す。



第3.3-1図 支持架構の設計フロー

支持架構は、角形鋼管やH形鋼などから構成し、防護ネット及び防護板からの荷重を支持する設計とする。

支持架構は、支持架構部材、支持架構の接続部及び柱脚部より構成され、支持架構の接続部は溶接またはボルトにより接続し、柱脚部は基礎に固定する設計とする。支持架構の接続部については、母材と同等の耐力を有する設計とする。

防護ネット及び防護板への飛来物衝突時の荷重は、隣り合う支持架構部材から柱などの主架構及び柱脚を介して基礎へ伝達する設計とする。飛来物が支持架構に直接衝突する場合は、支持架構から柱脚を介して基礎へ伝達する設計とする。

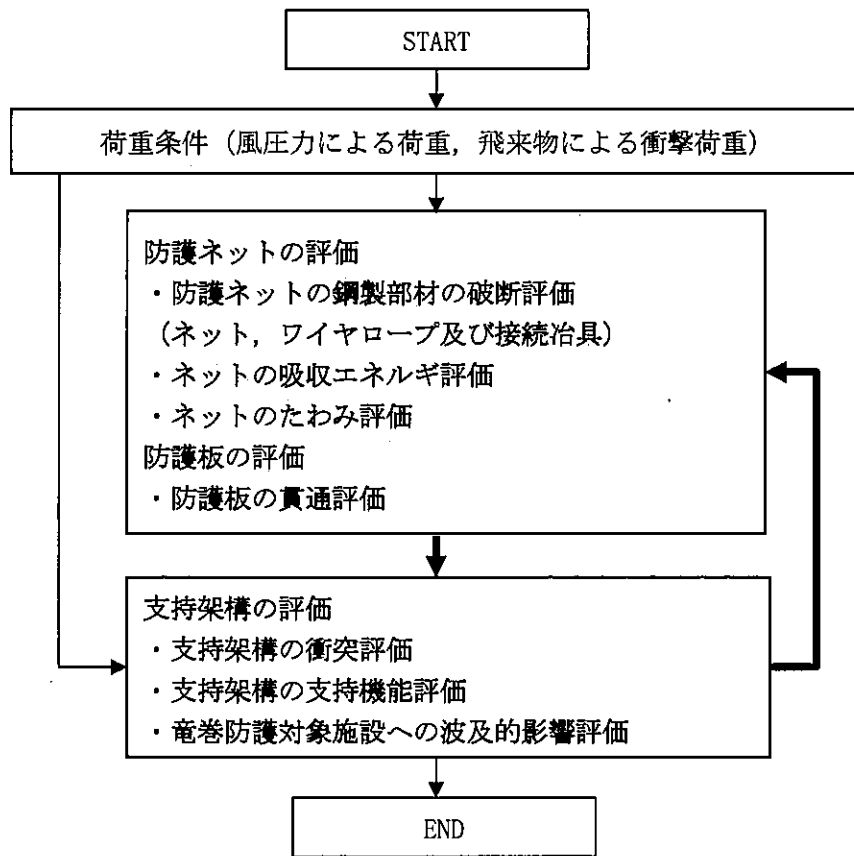
4. 竜巻防護対策設備の構成要素の評価方針

「2.3 荷重及び荷重の組合せ」、「2.5 評価方針」及び「3. 竜巻防護対策設備の構成要素の設計方針」に基づき、竜巻防護対策設備の構成要素ごとの評価方針を設定する。

竜巻防護対策設備を設計する上で、飛来物の衝突回数については、屋外の鋼製材等の飛来物となり得るものは、飛散防止管理を実施し、飛来物となるものが少なくなるように運用することにより、竜巻時及び竜巻通過時において複数の飛来物が同一の竜巻防護対策設備に衝突する可能性は十分低いことから、同一の竜巻防護対策設備への複数の飛来物の衝突は考慮しない設計とする。

竜巻防護対策設備は、飛来物の衝突に対し、竜巻防護対策設備を構成する部材が許容限界に至ることなく、竜巻防護対象施設が飛来物の影響を受けないことを確認する。

竜巻防護対策設備の評価フローを第4.-1図に示す。



→ 構成要素単体の評価条件
 → 異なる構成要素への評価結果のアウトプット

第4.-1図 竜巻防護対策設備の評価フロー

4.1 防護ネットの評価方針

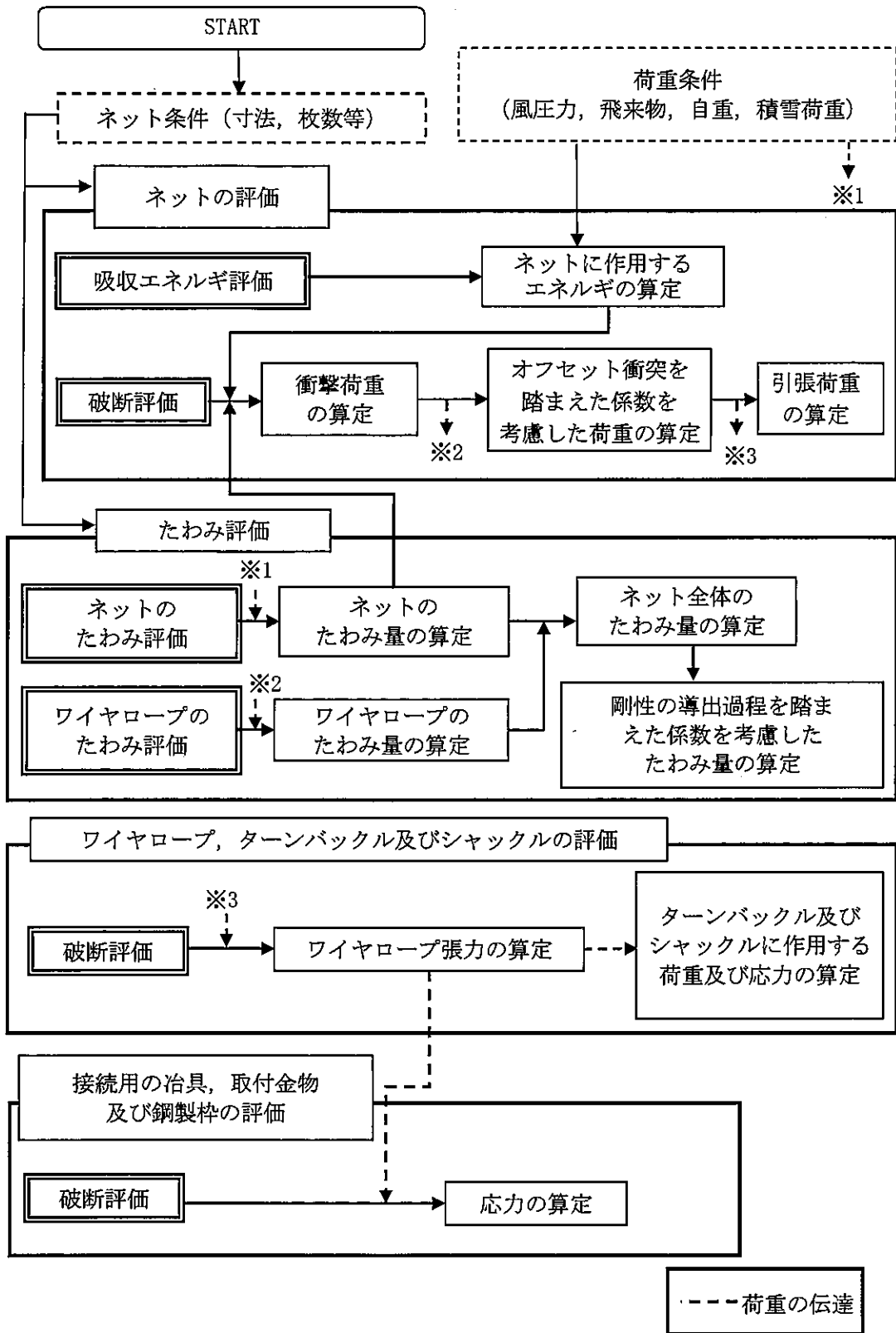
「2.5(1) 防護ネット」の評価方針に基づき、設計荷重（竜巻）に対し、主要な部材が破断しないために、防護ネットのうちネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）が、破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを計算により確認する。その方法は、「6.1 防護ネットの強度評価」に示すとおり、算出されるネットの限界吸収エネルギー及び衝撃荷重を基に吸収エネルギー評価及び破断評価を行う。

また、設計荷重（竜巻）に対し、ネット及びワイヤロープにたわみが生じて、飛来物が竜巻防護対象施設と衝突しないよう、竜巻防護対象施設との離隔を確保できることを計算により確認する。その方法は、「6.1 防護ネットの強度評価」に示すとおり、算出されるネットのたわみ量を基にたわみ評価を行う。

防護ネットの評価フローを第4.1-1図に示す。防護ネットは竜巻による荷重が作用する場合に、破断が生じることなく、たわみが生じたとしても飛来物が竜巻防護対象施設と衝突しないような離隔を有することを確認する。

防護ネットの破断及びたわみに対する評価方針を以下に示す。

防護ネットの具体的な計算方法及び結果は、添付書類「V-別添1-4 竜巻防護対策設備の強度計算書」に示す。



第4.1-1図 防護ネットの評価フロー

(1) 強度評価

設計荷重（竜巻）に対し、主要な部材が破断しないために、防護ネットのうちネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）に破断が生じないように十分な余裕を持った強度を有することを計算により確認する。

自重、積雪荷重、風圧力による荷重及び飛来物による衝撃荷重がネットに作用する場合に、ネットに破断が生じないように十分な余裕を持った強度を有することを確認するために、以下を評価する。

ネットについては、設計竜巻による荷重が作用する場合に、ネット全体でエネルギーを吸収することから、ネットの吸収エネルギーを評価する。評価方法としては、電中研報告書において、ネットへの適用性が確認されている評価式（以下「電中研評価式」という。）を参照して評価する。また、飛来物の衝突箇所において破断が生じないことを確認するために、ネットに作用する引張荷重を、電中研評価式を参照して評価する。さらに、ネットが機能を発揮できるために、ネットに作用する荷重がワイヤロープ及び接続治具に伝達され、その荷重によりワイヤロープ及び接続治具（支持部）に発生する荷重、並びに接続治具（固定部）に発生する応力が許容値以下であることを確認する。

a. ネットの吸収エネルギー評価

ネットの吸収エネルギー評価においては、ネットの目合いの方向に従ってネット剛性を設定し、ネットのエネルギー吸収に有効な面積を考慮し、ネットの有効面積を設定し評価を実施する。また、飛来物の衝突位置の違いによりたわみ量の影響があり、衝突位置、ネットの剛性の設定によるたわみ量への影響を考慮して、評価を実施する。

b. ネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部、固定部）の接続部の破断評価

ネットの破断評価においては、ネットの有効面積を設定し評価する。

ネット、ワイヤロープ及び接続治具については、飛来物の衝突位置として、中央位置からずれた（以下「オフセット」という。）衝突についても考慮する。具体的には、電中研評価式では飛来物がネット中央位置に衝突する場合についてのみ評価を実施するため、オフセット位置に衝突する場合の評価においては、中央位置に衝突する場合とオフセット位置に衝突する場合の飛来物の移動距離を考慮した評価を実施する。

(2) たわみ評価

設計荷重（竜巻）に対し、飛来物が竜巻防護対象施設と衝突しないよう捕捉するために、防護ネットのうちネット及びワイヤロープが、たわみを生じても、飛来物が竜巻防護対象施設と衝突しないよう竜巻防護対象施設との離隔を確保できることを計算により確認する。

防護ネットは、設計荷重（竜巻）がネットに作用する場合に、ネットがたわむことでエネルギーを吸収することから、ネット及びワイヤロープがたわんでも、ネットと竜巻防護対象施設が衝突しないことを確認するために、ネットとワイヤロープのたわみ量を考慮して評価する。評価方法としては、電中研評価式等を用いて評価する。

評価の条件についても、構造強度評価と同様に飛来物のネットの衝突位置を考慮して評価を実施する。

4.2 防護板の評価方針

「2.5(2) 防護板」の評価方針に基づき、飛来物による衝撃荷重に対し、飛来物が竜巻防護対象施設に衝突することを防止するために、防護板が飛来物の貫通を生じない最小厚さ以上であることを確認する。

4.3 支持架構の評価方針

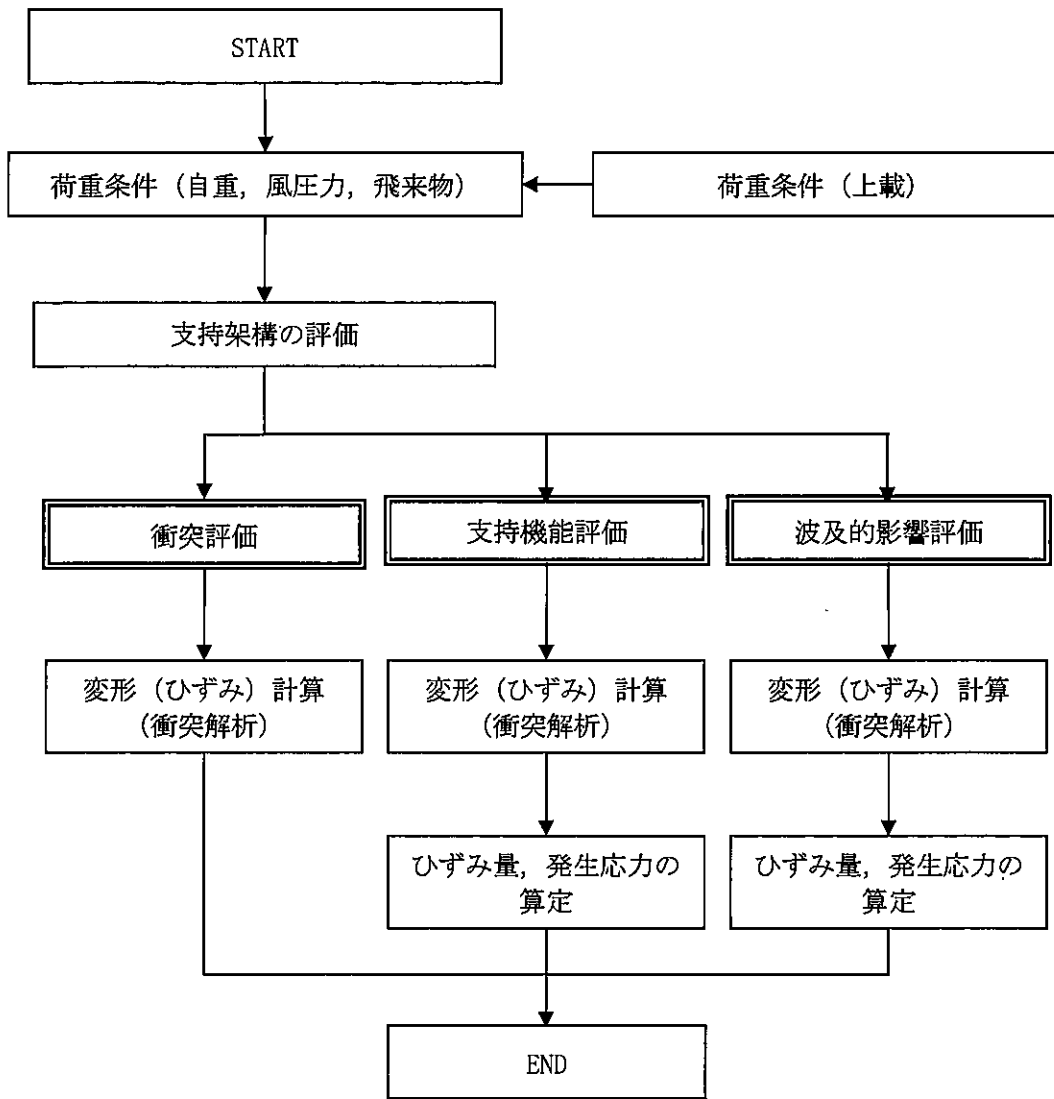
「2.5(3) 支持架構」の評価方針に基づき、設計荷重（竜巻）に対し、飛来物を貫通させないために、支持架構部材が終局状態に至るようなひずみを生じないことを解析により確認する。終局状態に至るようなひずみが確認される場合においては、その範囲を確認し飛来物が貫通するものでないことを確認する。

また、上載する防護ネット及び防護板の自重、並びに支持架構への飛来物の衝突時の荷重に対し、これらを支持する構造強度を有することの確認として、設計荷重（竜巻）に対し、支持架構に破断が生じないよう十分な余裕を持った強度が確保されていること、及び竜巻防護対策設備の支持架構が倒壊に至るような変形が生じないことを解析により確認する。

さらに、竜巻防護対象施設に波及的影響を与えないよう、支持架構全体が倒壊を生じないことの確認として、設計荷重（竜巻）に対し、支持架構の基礎が十分な余裕を持った強度が確保されていることを解析により確認する。

支持架構の評価フローを第4.3-1図に示す。

支持架構の具体的な計算方法及び結果は、添付書類「V-別添1-4 竜巻防護対策設備の強度計算書」に示す。



第4.3-1図 支持架構の評価フロー

(1) 衝突評価

設計荷重（竜巻）に対し，支持架構を構成する部材が飛来物を貫通させないために，支持架構部材が終局状態に至るようなひずみを生じないことを解析により確認する。評価方法はFEMを用いた解析とする。

(2) 支持機能評価

上載する防護ネット及び防護板の自重，積雪荷重並びに支持架構への飛来物衝突時の荷重に対し，これらを支持する構造強度を有することの確認として，設計荷重（竜巻）に対し，支持架構に破断が生じないよう十分な余裕を持った強度が確保されていること，及び竜巻防護対策設備の架構が倒壊に至るような変形が生じないことを解析により確認する。

設計竜巻の風圧力による評価，設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重が架構に作用する場合に，以下の通り確認する。

a. 架構部材

架構部材については，ひずみ量もしくは応力度を評価し破断が生じないことを確認する。評価方法はFEMを用いた解析とする。

b. 架構全体

架構全体については，飛来物が衝突した際の衝撃荷重により架構全体に生じる応答加速度に対して，架構が十分な余裕を持った強度が確保されていることを確認する。評価方法はFEMを用いた解析とする。

(3) 波及的影響評価

上載する防護ネット及び防護板の自重，積雪荷重並びに支持架構への飛来物衝突時の荷重に対し，竜巻防護対象施設に波及的影響を与えないよう，架構全体が倒壊を生じないことを解析により確認する。

5. 許容限界

「2.5 評価方針」及び「4. 竜巻防護対策設備の構成要素の評価方針」を踏まえ、竜巻防護対策設備の構成要素ごとの設計に用いる許容限界を設定する。

5.1 防護ネットの許容限界

5.1.1 許容限界の設定

(1) 強度評価

防護ネットは、設計荷重（竜巻）に対する評価を行うため、破断せず、荷重が作用するとしてもネットが内包する竜巻防護対象施設に飛来物を衝突させないために、ネットの主要な部材が、破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを許容限界として設定する。

防護ネットのうちネット、ワイヤロープ及び接続冶具（支持部及び固定部）の許容限界を以下のとおり設定する。

a. ネット

ネットの許容限界は、吸収エネルギー評価及び破断評価（引張荷重評価）において設定する。

吸収エネルギー評価は、飛来物によりネットに与えられる全エネルギーがネットの限界吸収エネルギー以下であることにより、ネットが破断しないことを確認することから、ネットの限界吸収エネルギーを許容限界とする。

破断評価は、ネットが破断を生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを確認する評価方針としている。ネットは、飛来物の衝突に対し、塑性変形することでエネルギーを吸収し、飛来物を捕捉することから、飛来物の衝撃荷重に対し、ネットの許容引張荷重を許容限界とする。ネットの許容限界を第5.1.1-1表に示す。

第5.1.1-1表 ネットの許容限界

許容限界	
吸収エネルギー評価の許容値	破断評価の許容値
n枚のネット及び 1枚の補助ネットを考慮した 限界吸収エネルギー	ネット設置枚数を考慮した 総交点強度
E_{max}	F_n

b. ワイヤロープ

ワイヤロープの端部にはワイヤグリップを取付ける。一般にワイヤロープの破断荷重の値はメーカーの引張試験によればJIS規格値よりも大きいので、ワイヤロープの許容限界は、JISに規定する破断荷重にワイヤグリップ効率 C_c を乗じた値とする。ワイヤロープの許容限界を第5.1.1-2表に示す。

第5.1.1-2表 ワイヤロープの許容限界

規格値	許容値
F_{bw} (注1)	C_c (注2) \cdot F_{bw} (注1)

注記 (注1) : JIS G 3549の破断荷重

(注2) : JIS B 2809及び(社)日本道路協会「小規模吊橋指針・同解説」

c. 接続治具（支持部）

接続治具（支持部）の強度評価は、接続治具（支持部）として、ワイヤロープを支持するターンバックル及びシャックルが、ワイヤロープから受ける引張荷重に対し、破断が生じない十分な強度を有することを確認する評価方針としていることを踏まえ、ターンバックルについてはJ I Sに規定する保証荷重の1.5倍を、シャックルについては試験結果に基づくメーカー保証値を許容限界とする。ターンバックル及びシャックルの許容限界を第5. 1. 1-3表に示す。

第5. 1. 1-3表 ターンバックル及びシャックルの許容限界

評価部位	許容荷重
ターンバックル	P_4 (注1)
シャックル	P_5 (注2)

注記 (注1) : JIS A 5540の保証荷重の1.5倍
(注2) : 試験結果に基づくメーカー保証値

d. 接続治具（固定部）

設計荷重（竜巻）は、ネットに作用し、ワイヤロープを介して接続治具に作用するため、評価対象は、接続治具（固定部）である隅角部固定ボルト、取付けプレート、取付ボルト、押さえボルト及び鋼製枠とする。

接続治具（固定部）の破断評価は、接続治具（固定部）に、破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を許容限界とする。具体的には、「鋼構造設計規準（2005改定）」に基づいた短期での許容応力度を許容限界とする。接続治具の許容限界を第5.1.1-4表に示す。

第5.1.1-4表 接続治具の許容限界

部位	隅角部固定ボルト 取付プレート	取付ボルト	押さえボルト	鋼製枠	
応力分類	せん断	引張	圧縮	曲げ	圧縮
許容限界	$1.5f_s$ (注1)	$1.5f_t$ (注2)	$1.5f_c$ (注2)	$1.5f_b$ (注3)	$1.5f_c$ (注4)

(注1) f_s ：許容せん断応力「鋼構造設計規準」（2005改定）に基づき算出する。

(注2) f_t ：許容引張応力「鋼構造設計規準」（2005改定）に基づき算出する。

(注3) f_b ：許容曲げ応力「鋼構造設計規準」（2005改定）に基づき算出する。

(注4) f_c ：許容圧縮応力「鋼構造設計規準」（2005改定）に基づき算出する。

(2) たわみ評価

ネットは、飛来物衝突時にたわんだとしても、飛来物が竜巻防護対象施設に衝突することがないように、十分な離隔を有していることを確認する評価方針としていることを踏まえ、ネットと竜巻防護対象施設の最小離隔距離 L_{min} を許容限界として設定する。ネットのたわみ評価の許容限界を第5.1.1-5表に示す。

第5.1.1-5表 ネットのたわみ評価の許容限界

許容限界
ネットと竜巻防護対象施設の最小離隔距離
L_{min}

5.1.2 許容限界の設定方法

(1) 記号の定義

防護ネットのうち、ネットの強度評価における許容値の算出に用いる記号を第5.1.2-1表に示す。

第5.1.2-1表 防護ネットの強度評価における許容値の算出に用いる記号

記号	単位	定義
a	mm	ネット1目合いの対角寸法
a _s	mm	ネット1目合いの破断変位
b	mm	飛来物の端面の長辺方向寸法
c	mm	飛来物の端面の短辺方向寸法
E _i	kJ	i番目の列におけるネットの吸収可能なエネルギー
E _{max}	kJ	ネット設置枚数nを考慮した吸収エネルギー
F _i	kN	飛来物衝突時のi番目の列における作用力
F _n	kN	ネット設置枚数nを考慮したネットの総交点強度
F ₅₀	kN	50 mm目合いネットの1交点当たりの許容引張荷重
F ₄₀	kN	40 mm目合いネットの1交点当たりの許容引張荷重
K	kN/m	ネット1目合いの等価剛性
K _x	kN/m	ネット設置枚数を考慮したネット1目合いの展開方向の1列の等価剛性
K _x '	kN/m	ネット1枚のネット1目合いの展開方向の1列の等価剛性
L _x	m	ネット展開方向寸法
L _y	m	ネット展開直角方向寸法
n	枚	ネットの設置枚数
N _i	個	i列目のネット展開直角方向目合い数
N _x	個	ネット展開方向目合い数
N _y	個	ネット展開直角方向目合い数
P _i	kN	飛来物衝突時にネットに発生するi番目の列における張力
X _i	m	i列目のネットの伸び
δ _i	m	飛来物衝突時のi番目の列におけるネットのたわみ量
δ _{max}	m	ネットの最大たわみ量
θ _i	deg	i番目の列におけるネットたわみ角
θ _{max}	deg	ネットの最大たわみ角

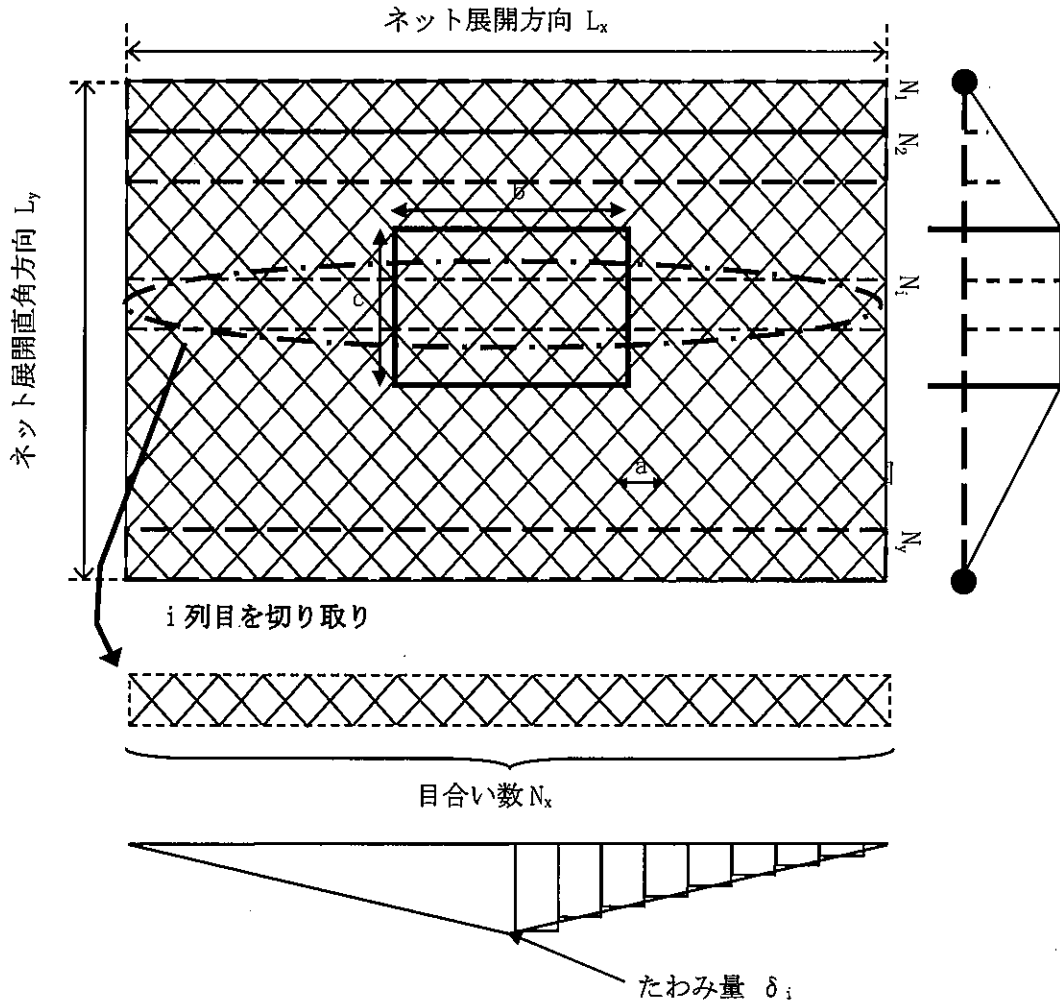
(2) ネットの吸収エネルギー評価

吸収エネルギー評価においては、計算により算出するネットの限界吸収エネルギーがネットに作用するエネルギー以上であることにより、ネットが破断しないことを確認する。ネット1目合いの要素試験の結果から得られる目合い展開方向の限界伸び量によりネットの最大変形角が定まり、ネット最大変形角における吸収エネルギーがネットの有する限界吸収エネルギー E_{max} となる。 E_{max} に係数を考慮した値を吸収エネルギー評価の許容限界とする。

限界吸収エネルギーは、複数枚を重ね合わせたネットを一体として扱ったモデルにて算出する。また、ネットの変形及び吸収エネルギーの分布を考慮したオフセット衝突位置での吸収エネルギー評価の結果、一般財団法人 電力中央研究所（以下「電中研」という。）の報告書を参照して、ネット最大たわみ時のネットの全長は飛来物のネットへの衝突位置によらずネット最大たわみ時展開方向の長さで一定であり、ネットに発生する張力も一定となることから、飛来物のネットへの衝突位置によらずネットから飛来物への反力も同等となり、オフセット位置への飛来物の衝突時の吸収エネルギーは中央衝突時と同等となる。したがって、吸収エネルギー評価では中央衝突の場合にて評価を行う。

さらに、設計条件の設定において等価剛性の算出方法の影響を裕度として考慮する。評価に用いる等価剛性は、引張試験による荷重-伸び曲線から各々の最大荷重発生時までの最大エネルギーを算出し、これらの平均値と等価な剛性を用いており、平均値と実測値との間で最大5.6%の差があることから、本影響を係数として考慮する。吸収エネルギー評価においては、等価剛性の影響を考慮した係数を限界吸収エネルギーが小さくなるように考慮する。

最大吸収エネルギーは、ネット1目合いの展開方向の1列の等価剛性、展開方向寸法及びたわみ量から、以下のとおり算出される。吸収エネルギー評価におけるネットのモデル図を第5.1.2-1図に示す。



第5.1.2-1図 吸収エネルギー評価におけるネットのモデル図

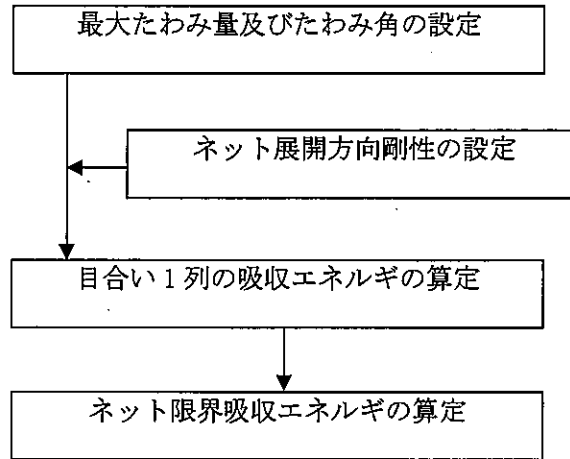
第5.1.2-1図に示すとおりネットの展開方向に1目合いごとに [] で囲った形に帯状に分割し、 N_1 から N_y までの各列が分担するエネルギーを各列のたわみ量から算定し、それらを積算することによりネットの吸収するエネルギーを算出し、ネットが吸収可能な限界吸収エネルギーを算出する。

ただし、中央部の最大たわみ量が発生する列数は、飛来物の寸法及びネット目合いの対角寸法から算出されるネット展開直角方向目合い列数を考慮して設定する。飛来物の端部寸法 ($b \times c$) 及びネット目合いの対角寸法 a を考慮し、最大たわみが発生する場合のネット展開直角方向目合い列数を以下のとおり算出する。ネットの吸収エネルギーが小さくなるよう、目合い列数の算出に用いる飛来物の寸法として値の小さい寸法 c を適用し、最大たわみが生じる目合い列数を少なくすることにより、限界吸収エネルギー量が小さくなるように評価する。

$$\text{ネット展開直角方向目合い列数} = \frac{c}{a}$$

評価モデルとしては、展開方向に1目合いごとに帯状に分割するモデルとしており、限界吸収エネルギー量が小さく算出されるよう、三角形モデルとして評価を実施する。

吸収エネルギー評価の許容限界の算定フローを第5.1.2-2図に示す。

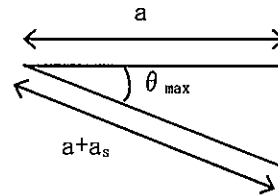


第5.1.2-2図 吸収エネルギー評価の許容限界の算定フロー

ネット1目合いの最大伸び量は，電中研報告書のネット目合いの引張試験から1目合いの最大破断変位が求められ，そこから算出する最大たわみ角から，飛来物が衝突した際の列の最大たわみ量 δ_{max} は次式により算定される。

$$\delta_{max} = \frac{L_x}{2} \cdot \tan(\theta_{max})$$

$$\theta_{max} = \cos^{-1} \left(\frac{a}{a+a_s} \right)$$



ネットを構成するネットの展開方向の目合い数 N_x は，ネット展開方向寸法 L_x 及びネット1目合いの対角寸法 a から求める。展開直角方向の目合い数 N_y は，ネット展開直角方向寸法 L_y 及びネット1目合いの対角寸法 a から求める。ネットを構成する1目合いはそれぞれ K の等価剛性を持っているため，1列当たりバネ定数 K を持つバネを N_x 個直列に接続したものと考えることができる。

そのため，1列当たりの剛性 K_x' は，

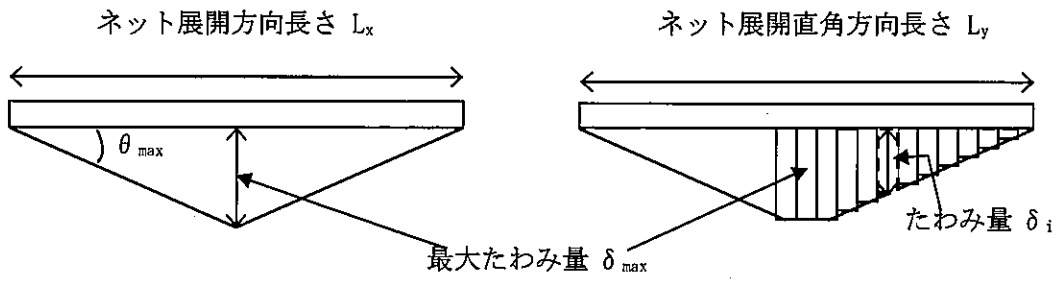
$$N_x = \frac{1000L_x}{a}, \quad N_y = \frac{1000L_y}{a}$$

$$\text{ネット展開方向剛性 } K_x' = \frac{K}{N_x}$$

となる。ただし， N_x ， N_y の算出において限界吸収エネルギーの値が小さくなるように N_x は保守的に切り上げ， N_y は保守的に切り捨てた値を用いる。また，補助ネットはネット0.5枚相当のエネルギー吸収能力があるため，ネット設置枚数を考慮したネット展開方向剛性 K_x は，次式により算出される。

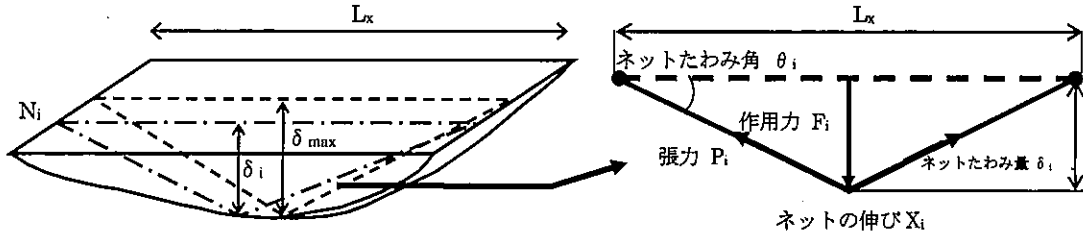
$$K_x = K_x' \cdot (n+0.5)$$

飛来物が衝突しなかった列のたわみ量 δ_i は，最大たわみ量 δ_{max} からネット端部のたわみ量0までの間を，非接触の列の数の分だけ段階的に減少していくと考える。ネットの最大たわみ量と最大たわみ角を第5.1.2-3図に示す。



第5.1.2-3図 ネットの最大たわみ量と最大たわみ角

ネットに飛来物が衝突した際のネットにかかる張力を、ネットの剛性及びネットの伸び量から算出する。ネットに作用する力のつり合いを第5.1.2-4図に示す。



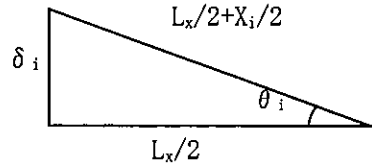
第5.1.2-4図 ネットに作用する力のつり合い

i 番目の列におけるネットの張力 P_i は、飛来物の衝突位置の左右を分割して考えると、伸び量は $\frac{X_i}{2}$ 、剛性は $2K_x$ となることから、

$$P_i = 2K_x \cdot \left(\frac{X_i}{2} \right) = K_x \cdot X_i$$

となる。また、作用力 F_i は変位量とたわみ量の関係から、

$$\begin{aligned} F_i &= 2P_i \cdot \sin(\theta_i) \\ &= 2K_x \cdot X_i \cdot \sin(\theta_i) \\ &= 2K_x \cdot L_x \cdot (\tan(\theta_i) \cdot \sin(\theta_i)) \\ &= 4K_x \cdot \delta_i \cdot \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2}} \right) \dots (5.1) \end{aligned}$$



ネットに飛来物が衝突した際のネットにかかる作用力 F_i を積分することにより i 番目の列における吸収エネルギー E_i を次式に示す。

$$\begin{aligned} E_i &= \int_0^{\delta_i} F_i d\delta_i \\ &= \int_0^{\delta_i} 4K_x \cdot \delta_i \cdot \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2}} \right) d\delta_i \\ &= 2K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \cdot (\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x) \dots (5.2) \end{aligned}$$

以上から、 n 枚のネット及び1枚の補助ネットを考慮した限界吸収エネルギー E_{max} は、各列の吸収エネルギー E_i を第1列から第 N_y 列まで積算することにより求められる。

$$\begin{aligned} E_{max} &= \sum_{i=1}^{N_y} E_i \\ &= \sum_{i=1}^{N_y} \left(2K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \cdot (\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x) \right) \dots (5.3) \end{aligned}$$

飛来物衝突時にネットに生じるエネルギー並びに自重、積雪荷重及び風圧力により生じるエネルギーの総量を算出し、等価剛性の算出方法の影響から定められる係数を考慮した n 枚のネット及び1枚の補助ネットから算出される限界吸収エネルギーを E_{max}' とする。

係数としては、上記を踏まえ $\frac{1}{1.056}$ 倍と定める。

したがって、限界吸収エネルギーの許容限界は、以下のとおりである。

$$E_{\max}' = \frac{1}{1.056} E_{\max}$$

新R ① JN 火G V 00239 C

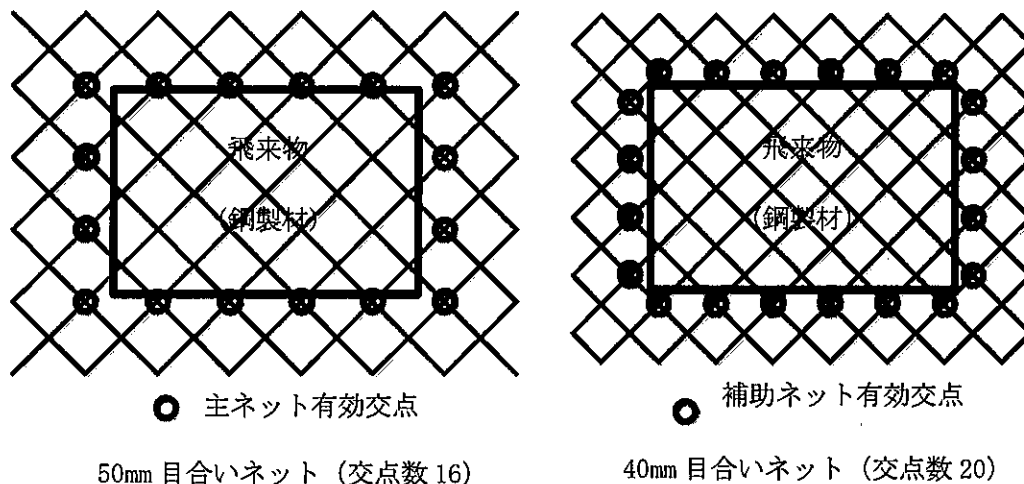
(3) ネットの許容引張荷重の評価

破断評価においては、計算により算出するネットに作用する荷重がネットの素材の持つ破断強度以下であることにより、ネットに破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを確認する。

破断評価モデルを第5.1.2-5図に示す。ネット構造及び飛来物の大きさを考慮し、衝突位置周辺の交点数が最小となるモデル化を行う。衝突位置周辺の交点数はネット1枚あたり16点（主ネット）および20点（補助ネット）となる。

ネットは、飛来物の衝突に対し、塑性変形することでエネルギーを吸収し、飛来物を捕捉することから、ネット交点の破断試験結果から算出したネット1目合いに作用する引張荷重を安全側に整理したものと全有効交点数から算出される総交点強度を許容限界とする。具体的には、引張強度評価においては、ネット交点に作用する引張荷重を算出するため、電中研報告書を参照してネット交点の引張試験に基づいたネット交点の破断荷重 F_{50} 及び F_{40} に全有効交点数を乗じた総交点強度 F_n を許容限界とする。なお、破断評価では補助ネットの交点数も考慮する。

$$F_n = F_{50} \times 16 \times 2 + F_{40} \times 20 \times 1$$



第5.1.2-5図 破断評価モデル図

5.2 防護板の許容限界

5.2.1 衝突評価

飛来物による衝撃荷重に対し、飛来物が竜巻防護対象施設に衝突することを防止するために、飛来物が防護板を貫通しないことを確認する評価方針としていることを踏まえ、計算にて求められる防護板が飛来物の貫通を生じない最小厚さを許容限界として設定する。

5.2.2 許容限界の設定方法

(1) 記号の定義

防護板の貫通限界厚さの算出に用いる記号を第5.1.2-2表に示す。

第5.1.2-2表 BRL式による貫通限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義
D	m	飛来物の(等価)直径
K	—	鋼板の材質に関する係数
M	kg	飛来物の質量
T	m	貫通限界厚さ(鋼製材)
V	m/s	飛来物の衝突速度(水平)
L	m	飛来物断面の外周長さ

(2) 防護板の貫通限界厚さの評価

飛来物が防護板に直接衝突した場合の貫通限界厚さを「タービンミサイル評価について(昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会)」で用いられているBRL式を用いて算出する。BRL式を以下に示す。

$$T^{\frac{3}{2}} = \frac{0.5 \cdot M \cdot V^2}{1.4396 \cdot 10^9 \cdot K^2 \cdot D^{\frac{3}{2}}}$$

ここで、等価直径Dは下式のとおり。

$$D = \frac{L}{\pi}$$

5.3 支持架構の許容限界

5.3.1 衝突評価

設計竜巻の風圧力による荷重，設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し，支持架構が飛来物を貫通させないために，支持架構部材が終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する評価方針としていることを踏まえて，部材のひずみが破断ひずみを超えないことを許容限界として設定する。破断ひずみは，JISに規定されている伸びの下限値を基に設定するが，「Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Design」（以下「NEI07-13」という。）において，TF（多軸性係数）を2とすることが推奨されていることを踏まえ，安全余裕としてTF= 2 を考慮して設定する。

5.3.2 部材の支持機能評価

設計竜巻の風圧力による荷重，設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し，支持架構が防護ネット及び飛来物防護板を支持できるように，支持架構部材が終局状態に至るようなひずみが生じないことを解析により確認する評価方針としていることを踏まえて，部材のひずみが破断ひずみを超えないことを許容限界として設定する。破断ひずみは，JISに規定されている伸びの下限値を基に設定するが，「NEI07-13」において，TF（多軸性係数）を2とすることが推奨されていることを踏まえ，安全余裕としてTF= 2 を考慮して設定する。

5.3.3 支持架構全体の支持機能評価

設計竜巻の風圧力による荷重，設計飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し，支持架構が倒壊に至るような変形が生じないことを計算により確認する方針としていることを踏まえ，設計荷重（竜巻）に対し，主要部材が破断しないよう十分な余裕を持った強度を許容限界とする。具体的には，「鋼構造設計規準」に基づいた短期の1.1倍での許容応力度を許容限界とする。

5.3.4 波及的影響評価

飛来物の衝突時の荷重に対し，竜巻防護対象施設に波及的影響を与えないことの確認として，支持架構の主要部材が破断せず（5.3.2項），支持架構全体が倒壊しないこと（5.3.3項）を確認する。

6. 強度評価方法

評価手法は、以下に示す解析法により、適用性に留意の上、規格及び基準類や既往の文献において適用が妥当とされる手法に基づき実施することを基本とする。

- ・ FEM等を用いた解析法
- ・ 定式化された評価式を用いた解析法

6.1 防護ネットの強度評価

(1) 評価方針

- a ネットの限界吸収エネルギーの算出においては、ネットの展開直角方向に1目合い毎に帯状に分割し、各列が分担するエネルギーを各列のたわみ量から算定し、それらを積算することによりネットの吸収するエネルギーを算出する。
- b ネットの限界吸収エネルギーの算出においては、ネットを構成する1目合いはそれぞれKの等価剛性を持っているため、1列当たりバネ定数Kを持つバネを N_x 個直列に接続したものと考える。
- c 自重、風圧力及び積雪荷重によるネットに作用する荷重は、ネット全体に等分布荷重として作用するものであり、ネット展開直角方向に対しては荷重が均一となるよう作用させる。
- d 一方、ネット展開方向に対しては、設計モデル上均一に荷重を作用させることが困難であるため、保守的にエネルギー量が大きくなるよう、自重、風圧力及び積雪荷重によりネットに作用する荷重 F_w が全てネット展開方向 L_x の中央に作用したとして、ネットにかかる作用力の式を用いて1列当たりの自重及び風圧力による荷重によりネットが受けるエネルギーを算出し、列数倍することでネット全体が自重、風圧力及び積雪荷重による荷重により受けるエネルギーを算出する。

(2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を第6.1-1表に示す。

第6.1-1表 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位		評価内容
ネット		・ 限界吸収エネルギー ・ 引張 ・ たわみ
ワイヤロープ		・ 引張 ・ たわみ*
接続治具 (支持部)	ターンバックル	・ 引張
	シャックル	・ 引張
接続治具 (固定部)	隅角部固定ボルト	・ せん断
	取付プレート (支持架構設置) 取付プレート (鋼製枠設置)	・ せん断
	取付ボルト	・ 引張
	押さえボルト	・ 圧縮
	鋼製枠	・ 組合せ (曲げと圧縮)

注記 * : ネット全体のたわみ評価に用いる。

(3) 強度計算

a 記号の定義

ネットの強度評価に用いる記号を第6.1-2表に示す。

第6.1-2表 強度評価に用いる記号(1/3)

記号	単位	定義
A_{b1}	mm^2	隅角部固定ボルト有効断面積
A_{b2}	mm^2	取付金物の取付ボルト有効断面積
A_{b3}	mm^2	取付金物の押さえボルト有効断面積
A_{s1}	mm^2	取付プレート（支持架構設置）の有効せん断面積
A_{s2}	mm^2	取付プレート（鋼製柱設置）の有効せん断面積
a_w	mm	取付プレート溶接部ののど厚
E_f	kJ	飛来物衝突時にネットに作用するエネルギー
E_i	kJ	i番目の列におけるネットの吸収可能なエネルギー
E_{\max}	kJ	ネット設置枚数nを考慮した吸収エネルギー
E_t	kJ	ネット設置枚数nを考慮したネットに作用する全エネルギー
E_w	kJ	自重、積雪荷重、風圧力によりネットに作用するエネルギー
F_a	kN	飛来物衝突時にネットが受ける最大衝撃荷重
F_a'	kN	衝突位置を考慮した飛来物衝突時にネットが受ける衝撃荷重
F_p	kN	ワイヤロープにより支持部に作用する荷重
F_{p1}	kN	1枚目ネットのワイヤロープにより支持部に作用する荷重
F_{p2}	kN	2枚目ネットのワイヤロープにより支持部に作用する荷重
F_w	kN	自重、積雪荷重、風圧力によりネットに作用する荷重
F_x	kN	取付金物及び鋼製柱に作用する展開方向荷重
F_y	kN	取付金物及び鋼製柱に作用する展開直角方向荷重
F_z	kN	取付金物及び鋼製柱に作用する鉛直方向荷重
H	mm	取付金物の取付け面から緩衝装置中心までの距離
K_x	kN/m	ネット設置枚数を考慮したネット1目合いの展開方向の1列の等価剛性
L_1	mm	取付金物のモーメント支点からボルトまでの距離
L_2	mm	取付金物のモーメント支点から緩衝装置中心までの距離
L_3	mm	鋼製柱下端から緩衝装置中心までの距離
L_4	mm	鋼製柱の緩衝装置中心から取付ボルト群中心までの距離
L_b	m	変形前のワイヤロープ長さ
L_{pw}	mm	取付プレート溶接部の有効長さ

第6.1-2表 強度評価に用いる記号(2/3)

記号	単位	定義
L_{p1}	mm	取付プレート（支持架構設置）取付け孔位置寸法
L_{p2}	mm	取付プレート（支持架構設置）取付け孔位置寸法
L_{p3}	mm	取付プレート（鋼製枠設置）長さ（縦方向）
L_{p4}	mm	取付プレート（鋼製枠設置）長さ（横方向）
L_{p5}	mm	取付プレート（鋼製枠設置）取付け孔位置寸法
L_x	m	ネット展開方向寸法
L_y	m	ネット展開直角方向寸法
L_z	m	ワイヤロープの全長
m	kg	飛来物の質量
M_p	kN・mm	鋼製枠に発生するモーメント
N_y	個	ネット展開直角方向目合い数
n	枚	ネット設置枚数
n_2	個	隅角部固定ボルト本数
n_3	個	取付金物の取付ボルト評価対象ボルト本数
P_s	kN	ネットへの積雪により作用する荷重
P_w	kN	ネットの自重により作用する荷重
P_l	kN	取付金物の取付ボルトに作用する引張荷重
S	m	変形後のワイヤロープ長さ
S_x	m	ネット展開方向と平行に配置されているワイヤロープの変形後の長さ
S_y	m	ネット展開直角方向と平行に配置されているワイヤロープの変形後の長さ
S_w	mm	取付プレート（鋼製枠設置）溶接部の溶接脚長
T'	kN	飛来物のネットへの衝突によりn枚のネットに発生する張力の合計の最大値
T_1	kN	飛来物のネット中央への衝突により1枚のネットのワイヤロープ1本に作用する張力の最大値
T_1'	kN	衝突位置を考慮した飛来物のネットへの衝突により1枚目のネットのワイヤロープ1本に作用する張力の最大値
T_T	kN	全ワイヤロープの合計張力
t_2	mm	取付プレート（支持架構設置）の板厚
t_3	mm	取付プレート（鋼製枠設置）の板厚
v_1	m/s	飛来物衝突時の速度
W_w	kN	風圧力によりネットに作用する荷重
Z_y	mm ³	鋼製枠の断面係数（弱軸）
δ	m	飛来物衝突時のネットの最大たわみ量
δ'	m	飛来物衝突時のワイヤロープの変形による伸び量

第6.1-2表 強度評価に用いる記号(3/3)

記号	単位	定義
δ_a	m	自重, 積雪荷重及び風圧力による荷重によるたわみ量
δ_i	m	飛来物衝突時のi番目の列におけるネットのたわみ量
δ_t	m	ワイヤロープのたわみ量を含めたネット全体のたわみ量
δ_t'	m	等価剛性の導出過程を踏まえた係数を考慮したネット全体の最大たわみ量
δ_w	m	ワイヤロープのたわみ量
δ_{wx}	m	ネット展開方向に平行に配置されているワイヤロープの変形後のたわみ量
δ_{wy}	m	ネット展開直角方向に平行に配置されているワイヤロープの変形後のたわみ量
ε	-	ワイヤロープのひずみ量
θ	deg	飛来物衝突時のネットのたわみ角
θ_{h1}	deg	ネット展開方向に平行なワイヤロープの水平投影たわみ角
θ_{h2}	deg	ネット展開直角方向に平行なワイヤロープの水平投影たわみ角
θ_i	deg	i番目の列におけるネットたわみ角
θ_{w1}	deg	ネット展開方向に平行なワイヤロープのたわみ角
θ_{w2}	deg	ネット展開直角方向に平行なワイヤロープのたわみ角
θ_x	deg	飛来物衝突時のネット展開方向に平行のネットたわみ角
θ_y	deg	飛来物衝突時のネット展開直角方向に平行のネットたわみ角
σ_b	MPa	鋼製枠に作用する曲げ応力
σ_{b1}	MPa	取付金物の取付ボルトに発生する引張応力
σ_{b2}	MPa	取付金物の押さえボルトに発生する圧縮応力
σ_c	MPa	鋼製枠に作用する軸方向圧縮応力
τ_{p1}	MPa	取付プレート(支持架構設置)に発生するせん断応力
τ_{p2}	MPa	取付プレート(鋼製枠設置)に発生するせん断応力
τ_s	MPa	隅角部固定ボルトに発生するせん断応力
τ_w	MPa	取付プレート(鋼製枠設置)溶接部に発生するせん断応力
ϕd_1	mm	取付プレート(支持架構設置)の孔径
ϕd_2	mm	取付プレート(鋼製枠設置)の孔径

b. 吸収エネルギー評価

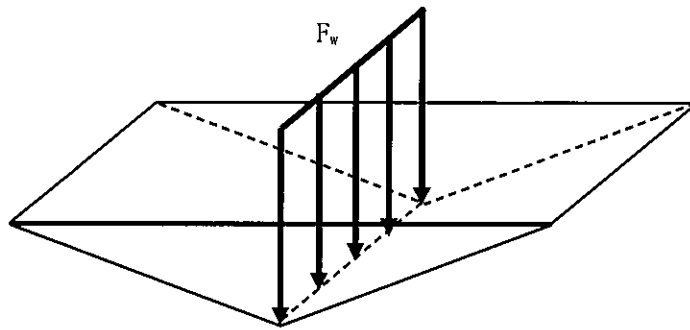
吸収エネルギー評価においては、電力中央研究所の評価式を参照して、ネットが異方性材料であることを考慮した吸収エネルギー量算定のモデル化を行い、自重、積雪荷重、風圧力による荷重及び飛来物による衝撃荷重によるエネルギーがネットの有する最大吸収エネルギーを下回ることを確認する。

(5.3) 式より、 E_{\max} は以下のとおりである。

$$E_{\max} = \sum_{i=1}^{N_y} \left(2K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \left(\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \right)$$

自重、積雪荷重及び風圧力による荷重によりネットに作用する荷重は、ネット全体に等分布荷重として作用するものであるため、実現象に合わせネット展開直角方向に対しては荷重が等分布となるよう作用させる。一方、ネット展開方向に対しては、評価モデル上の制約により均一に荷重を作用させることが困難であるため、ネットに作用するエネルギーが保守的に大きくなるよう、 F_w が全てネット展開方向 L_x の中央に作用したとして、ネットにかかる作用力の式を用いて展開方向の1列当たりの自重、積雪荷重及び風圧力による荷重によりネットが受けるエネルギーを算出し、列数倍することでネット全体が自重、積雪荷重及び風圧力による荷重により受けるエネルギーを算出する。自重、積雪荷重及び風圧力の作用イメージを第6.1-1図に示す。

評価条件である K_x 及び L_x 並びに自重、積雪荷重及び風圧力による荷重から算出する F_w を(5.1)式に代入して数値計算を実施することにより、自重、積雪荷重及び風圧力による荷重によるたわみ量 δ_a が算出される。



第6.1-1図 自重、積雪荷重及び風圧力の作用イメージ

$$F_w = N_y \cdot 4K_x \cdot \delta_a \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_a^2 + L_x^2}} \right)$$

但し、 $F_w = P_w + W_w + P_s$

上式にて算出した δ_a を (5.3) 式において、展開方向の1列当たりの自重、積雪荷重及び風圧力による荷重によりネットが受けるエネルギーを列数倍する以下の式に代入することにより、自重、積雪荷重及び風圧力による荷重によりネットが受けるエネルギー E_w が算出される。

$$E_w = N_y \cdot \left(2K_x \cdot \delta_a^2 - K_x \cdot L_x \left(\sqrt{4\delta_a^2 + L_x^2} - L_x \right) \right)$$

飛来物の衝突によりネットに作用するエネルギー E_f としては、衝突時の飛来物の運動エネルギーとして、以下より求められる。

$$E_f = \frac{1}{2} m v_1^2$$

飛来物の飛来速度は、ネット設置方向により水平設置の場合は鉛直の飛来速度、鉛直設置の場合は水平の飛来速度にて算出する。斜め方向から衝突した場合の飛来速度の水平方向速度成分及び鉛直方向速度成分は、評価に用いる水平最大飛来速度及び鉛直最大飛来速度を下回る。また、飛来物がネットに対して斜め方向から衝突する場合は、飛来物が衝突後に回転し、ネットと飛来物の衝突面積が大きくなるため、ネットに局部的に作用する荷重は小さくなる。したがって、飛来物の衝突方向は、ネットに局部的に作用する荷重が大きくなるようにネットに対して垂直に入射するものとし、その飛来速度はネット設置方向に応じ、水平設置の場合は鉛直最大飛来速度、鉛直設置の場合は水平最大飛来速度を用いる。

以上から、 n 枚のネット及び1枚の補助ネットを考慮したネットに作用する全エネルギー E_t が以下のとおり算出される。

$$E_t = E_f + E_w \quad \dots (6.1)$$

c. 破断評価

(a) ネットの引張荷重評価

ネットに飛来物が衝突した際に生じる衝撃荷重の最大値 F_a は、「2.3 荷重及び荷重の組合せ」にて算出した(2.8)式のたわみ量と飛来物による衝撃荷重の関係式を用いて算出する。

飛来物の衝突による荷重に加え、自重、積雪荷重及び風圧力による荷重を考慮するため、 E_f を E_t と置き換えて、(6.1)式より、

$$F_a = \frac{8E_t}{3 \cdot \delta}$$

となる。

E_t としては、(6.1)式に基づいて飛来物による運動エネルギー E_f 並びに自重、積雪荷重及び風圧力による荷重によりネットが受けるエネルギー E_w から算出したネットに作用する全エネルギー量を代入する。 δ としては、たわみ評価で算出する飛来物が衝突する場合のネットの最大たわみ量を代入し、 F_a を算出する。

ここで、オフセット衝突による衝撃荷重の増加分を踏まえた係数1.22を考慮し、衝撃荷重の最大値 F_a' は

$$F_a' = F_a \cdot 1.22$$

と算出される。

(b) ワイヤロープの破断評価

破断評価における衝撃荷重と、ネットとワイヤロープの接続構造からワイヤロープに作用する荷重を導出する。

ワイヤロープの設計において、ワイヤロープに発生する荷重として以下を考慮する。

- ① ネットの自重により作用する荷重
- ② 風圧力及び積雪荷重によりネットに作用する荷重
- ③ 飛来物の衝突によりネットに作用する衝撃荷重

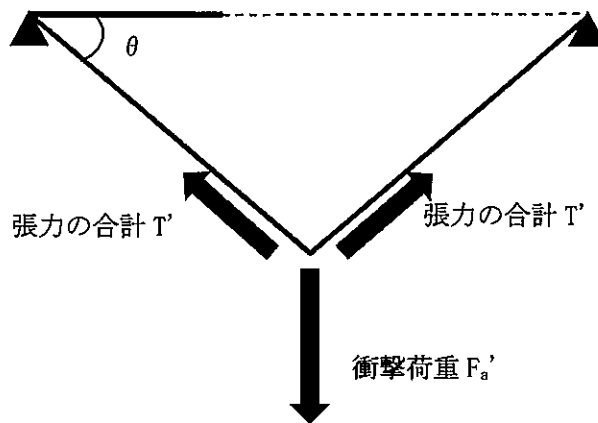
ネットは、電中研報告書と同様に2本のワイヤロープをL字に設置し、さらにワイヤロープが接続用の治具により拘束されない構造としており、電中研報告書において実施されている衝撃試験における実測値が包絡されることを確認している評価式を用いて評価を実施する。ネットに発生する荷重のつり合いのイメージ図を第6.1-2図に示す。

自重、積雪荷重、飛来物の衝撃荷重及び風圧力による荷重によりネットに作用する衝撃荷重の最大値 F_a' が集中荷重として作用するとしてモデル化すると、飛来物が衝突する場合のネットn枚及び補助ネット1枚に発生する張力の合計の最大値 T' は、第6.1-2図の力のつり合いより以下のとおり算出される。

$$T' = \frac{F_a'}{2 \sin \theta}$$

θ は以下の式で求められる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\delta}{L_x}$$



第6.1-2図 ネットに発生する荷重のつり合い

各辺のワイヤロープは結合されていることから張力が一定となるため、ワイヤロープ1本が負担する張力は等分されると設定する。電中研報告書を参照すると、ネットn枚及び補助ネット1枚を重ねて設置する場合、補助ネットを設置したネットのワイヤロープに作用する張力は、その他のネットの張力の1.5倍となることを考慮すると、ネットn枚及び補助ネット1枚を重ねて設置する場合、1枚のネットのワイヤロープに発生する張力の最大値 T_1' は、

$$T_1' \cdot 2 + \frac{2 \cdot 2}{3} T_1' \cdot (n-1) = T'$$

$$T_1' = \frac{3}{4n+2} T' = \frac{3}{4(2n+1)} \cdot \frac{F_a'}{\sin \theta}$$

と算出される。

また、全ワイヤロープの合計張力 T_T は、

$$T_T = \frac{T'}{2}$$

と算出される。

ネットに対して飛来物がオフセット衝突した場合においても、各ワイヤロープに対して均等に張力が発生することが衝突試験により確認されており、算出結果は飛来物の衝突位置によらず適用可能である。

(c) 接続治具（支持部）の破断評価

イ ターンバックル

ターンバックルの評価については、以下の評価を実施する。

ターンバックルに作用するワイヤロープに発生する張力の最大値が、ターンバックルの許容限界未満であることを確認する。

ロ シャックル

シャックルの評価については、以下の評価を実施する。

シャックルに作用するワイヤロープに発生する張力の最大値が、シャックルの許容限界未満であることを確認する。

(d) 接続冶具（固定部）の破断評価

イ 隅角部固定ボルト

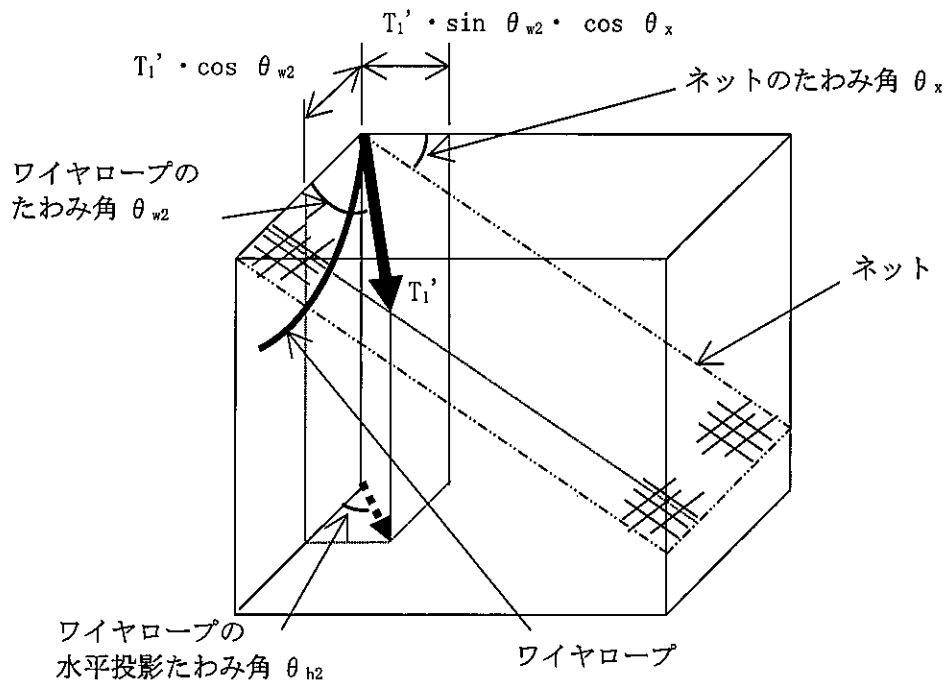
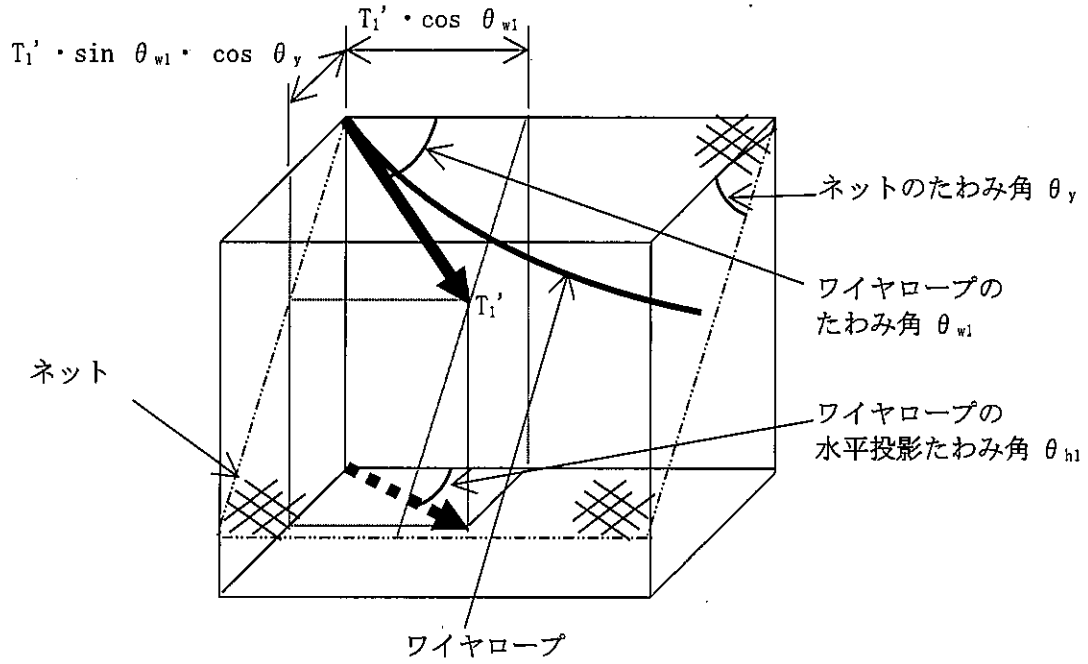
ワイヤロープは、設置するネット枚数に応じて設置するため、隅角部固定ボルトにかかる応力は、ネット枚数毎に評価する。

支持架構または鋼製枠の4隅に設置した隅角部固定ボルトは、ワイヤロープの荷重を、緩衝装置を介して受けることとなる。

ここで、ワイヤロープはたわみにより緩衝装置に対して θ_{h1} 、 θ_{h2} の水平投影たわみ角を有することから、隅角部固定ボルトへ作用する荷重にはこのたわみ角を考慮する。

鉛直方向成分は、水平方向成分のように隅角部固定ボルトに対する有意な荷重ではないことから、面内荷重で評価する。

ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係を第6.1-3図に、隅角部固定ボルトの荷重状態を第6.1-4図に示す。



第6.1-3図 ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係

これより、展開方向のワイヤロープの水平投影たわみ角 θ_{h1} は、

$$\theta_{h1} = \tan^{-1} \left(\frac{T_1' \cdot \sin \theta_{w1} \cdot \cos \theta_y}{T_1' \cdot \cos \theta_{w1}} \right) = \tan^{-1} (\tan \theta_{w1} \cdot \cos \theta_y)$$

より求まる。

ただし、 θ_y 、 θ_{w1} は以下の式で求められる。

$$\theta_y = \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \delta}{L_y} \right)$$

$$\theta_{w1} = \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1+16 \left(\frac{\delta_{wx}}{L_x} \right)^2}}$$

また、展開直角方向のワイヤロープの水平投影たわみ角 θ_{h2} は、

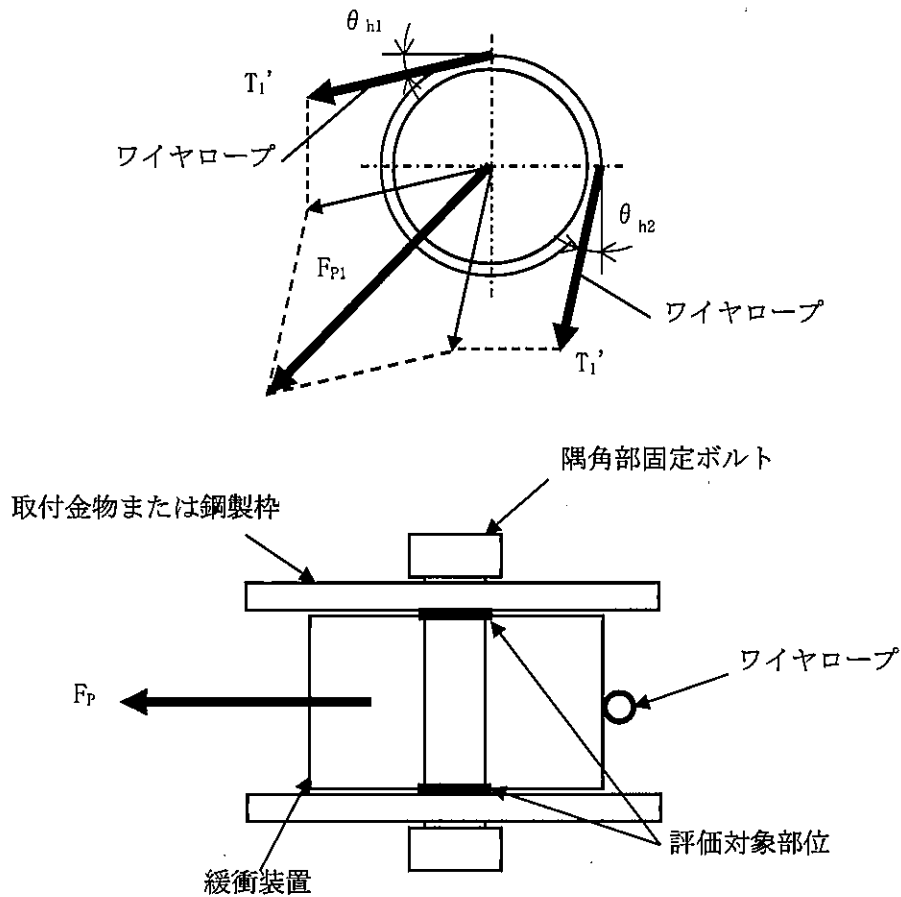
$$\theta_{h2} = \tan^{-1} \left(\frac{T_1' \cdot \sin \theta_{w2} \cdot \cos \theta_x}{T_1' \cdot \cos \theta_{w2}} \right) = \tan^{-1} (\tan \theta_{w2} \cdot \cos \theta_x)$$

より求まる。

ただし、 θ_x 、 θ_{w2} は以下の式で求められる。

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \delta}{L_x} \right)$$

$$\theta_{w2} = \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1+16 \left(\frac{\delta_{wy}}{L_y} \right)^2}}$$



第6.1-4図 隅角部固定ボルトの荷重状態

第6.1-4図より、隅角部固定ボルトに作用するワイヤロープからの荷重のうち、補助ネットを設置する1枚目のネットにより作用する荷重 F_{P1} は、

$$F_{P1} = \sqrt{(T_1' + T_1' \cos(90 - \theta_{h1} - \theta_{h2}))^2 + (T_1' \sin(90 - \theta_{h1} - \theta_{h2}))^2}$$

となる。

また、補助ネットを設置したネットのワイヤロープに作用する張力は、その他のネットの張力の1.5倍となることを考慮すると、1枚目のネット以外のネットのワイヤロープにより隅角部固定ボルトへ作用する荷重 F_{P2} は、

$$F_{P2} = \frac{F_{P1}}{1.5}$$

となる。

したがって、ワイヤロープにより支持部へ作用する荷重 F_p は、

$$F_p = F_{P1} + F_{P2} \cdot (n-1)$$

となる。

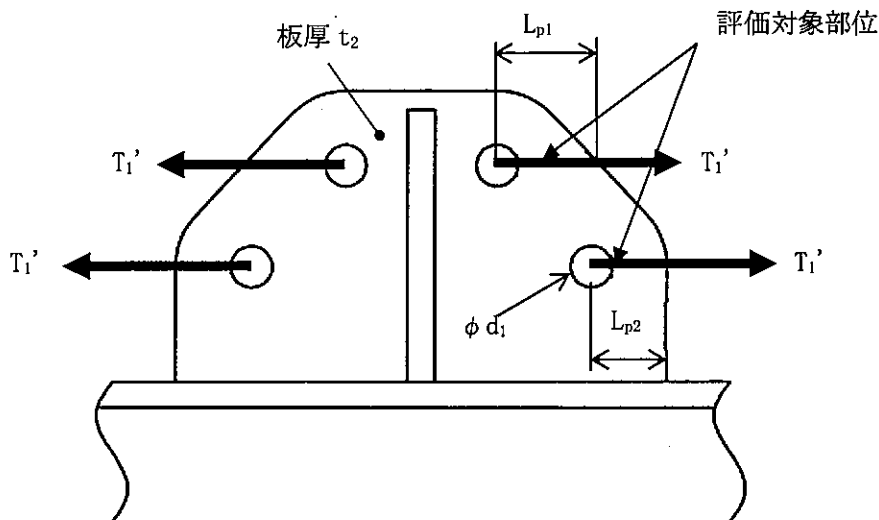
以上より、隅角部固定ボルトに発生するせん断応力 τ_s は、

$$\tau_s = \frac{F_p}{2 \cdot n_2 \cdot A_{b1}}$$

ロ 取付けプレート

① 取付プレート（支持架構設置）

飛来物がネットに衝突する場合にネット取付部への衝撃荷重は、ワイヤロープの引張荷重 T_1' として作用し、取付プレートにせん断応力が発生するため、せん断応力評価を実施する。取付プレートを第6.1-5図に示す。



第6.1-5図 取付プレート（支持架構設置）

取付プレートの有効せん断面積 A_{s1} は、

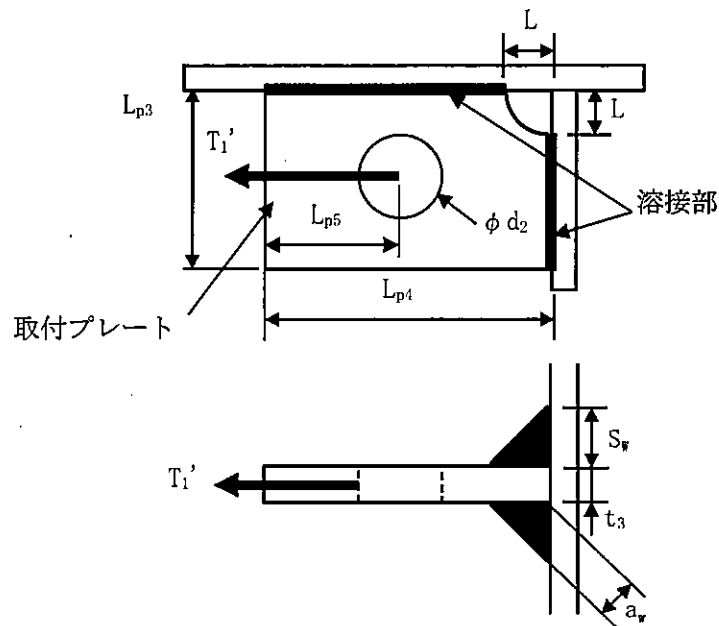
$$A_{s1} = 2 \cdot \left(\text{Min}(L_{p1}, L_{p2}) - \frac{d_1}{2} \right) \cdot t_2$$

取付プレートに発生するせん断応力 τ_{p1} は、

$$\tau_{p1} = \frac{T_1'}{A_{s1}}$$

② 取付プレート（鋼製枠設置）

飛来物がネットに衝突する場合にネット取付部への衝撃荷重は、ワイヤロープの引張荷重 T_1' として作用し、取付プレート及び隅肉溶接部にせん断応力が発生するため、せん断応力評価を実施する。取付プレート及び溶接部を第6.1-6図に示す。



第6.1-6図 取付プレート（鋼製枠設置）

溶接部の有効長さ L_{pw} は、

$$L_{pw} = L_{p3} - L - 2 \cdot S_w + L_{p4} - L - 2 \cdot S_w$$

溶接部に発生するせん断応力 τ_w は、

$$\tau_w = \frac{T_1'}{2 \cdot a_w \cdot L_{pw}}$$

ここで、溶接部ののど厚 a_w は以下により求められる。

$$a_w = \frac{S_w}{\sqrt{2}}$$

取付プレートの有効せん断面積 A_{s2} は、

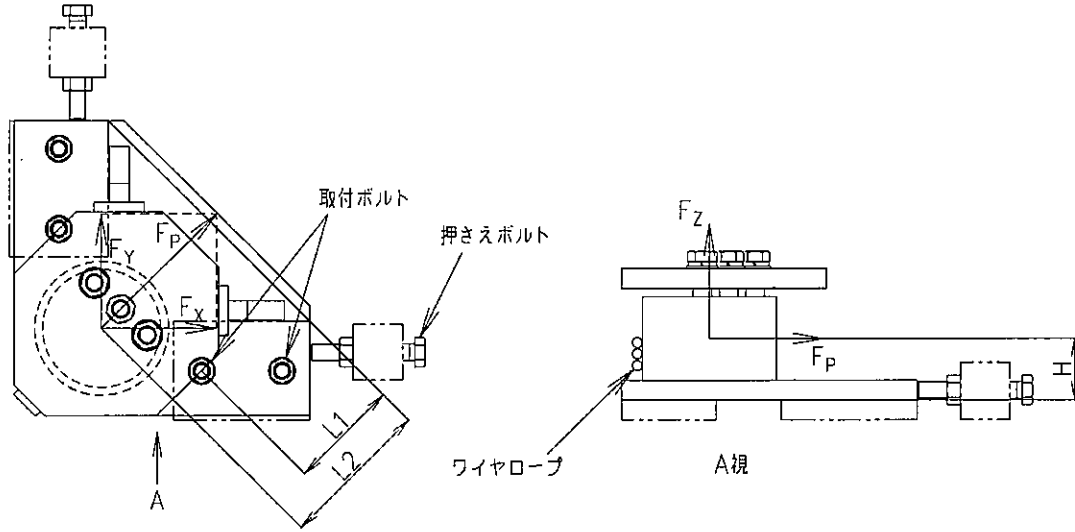
$$A_{s2} = 2 \cdot \left(L_{p5} - \frac{d_2}{2} \right) \cdot t_3$$

取付プレートに発生するせん断応力 τ_{p2} は、

$$\tau_{p2} = \frac{T_1'}{A_{s2}}$$

ハ. 取付ボルト, 押さえボルト

飛来物がネットに衝突するとワイヤロープを介して取付金物に荷重 F_x , F_y , F_z が作用し, 取付ボルトに引張応力が発生するため, 引張応力評価を実施する。また, 押さえボルトには圧縮応力が発生するため, 圧縮応力評価を実施する。取付金物を第6.1-7図に示す。



第6.1-7図 取付金物

取付ボルトへ作用する荷重 P_1 は, 緩衝装置中心部に生じるモーメントより, 以下の式で求められる。

$$P_1 = \frac{F_p \cdot H + F_z \cdot L_2}{L_1}$$

ここで,

$$F_z = T_r \cdot \sin \theta_{w1} \cdot \sin \theta_y + T_r \cdot \sin \theta_{w2} \cdot \sin \theta_x$$

取付ボルトに生じる引張応力 σ_{b1} は, 動的倍率を踏まえた係数1.52を考慮し,

$$\sigma_{b1} = \frac{P_1 \cdot 1.52}{n_3 \cdot A_{b2}}$$

また, 押さえボルトに生じる圧縮応力 σ_{b2} は, 動的倍率を踏まえた係数1.52を考慮し,

$$\sigma_{b2} = \frac{\text{Max}(F_x, F_y) \cdot 1.52}{A_{b3}}$$

ここで,

$$F_x = T_r \cdot \sin \theta_1 + T_r \cdot \cos \theta_2$$

$$F_y = T_r \cdot \cos \theta_1 + T_r \cdot \sin \theta_2$$

二. 鋼製柱

飛来物がネットに衝突するとワイヤロープを介して鋼製柱に荷重 F_x , F_y , F_z が作用し, 鋼製柱に曲げ応力及び圧縮応力が発生するため, 曲げ応力及び圧縮応力評価を実施する。鋼製柱の評価モデルを第6.1-8図に示す。

鋼製柱に作用する曲げ応力 σ_b は,

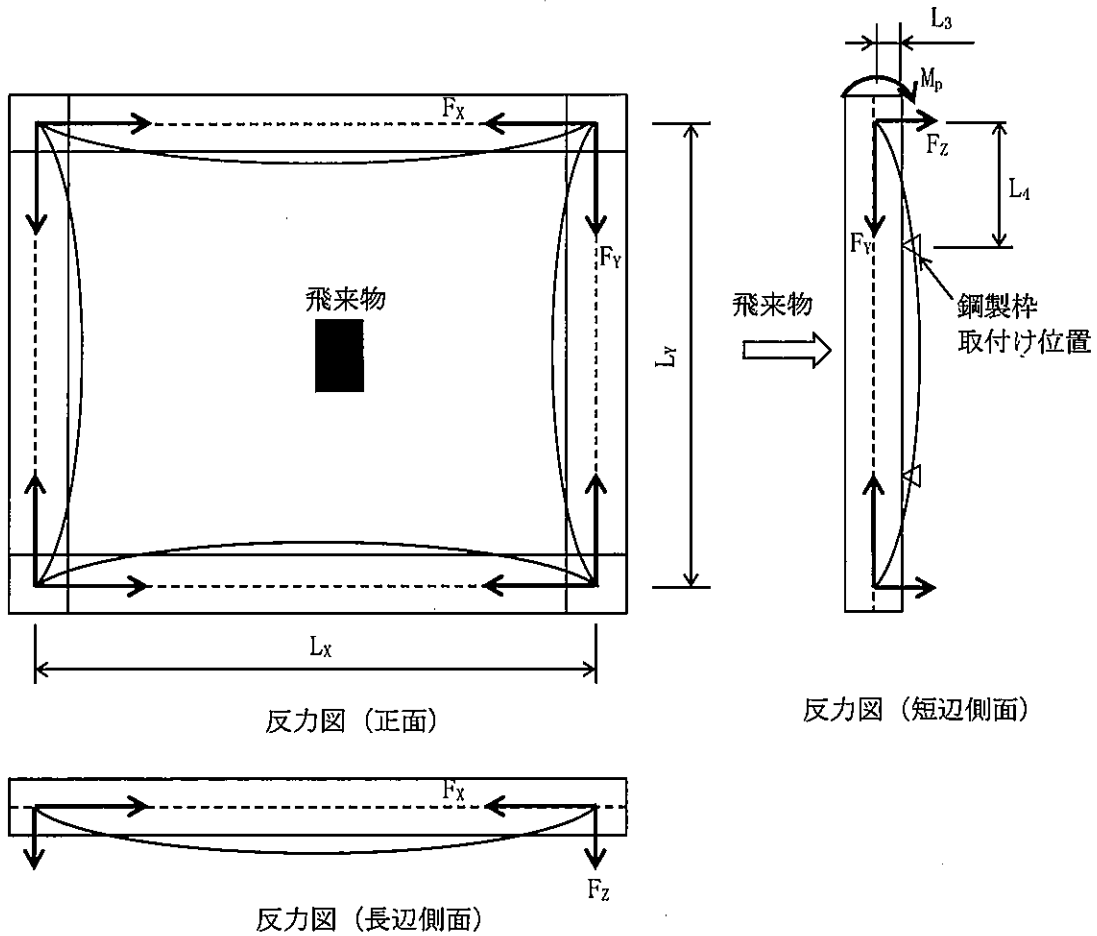
$$\sigma_b = \frac{M_p}{Z_y}$$

ここで,

$$M_p = |-F_y \cdot L_3 + F_z \cdot L_4|$$

また, 鋼製柱に作用する軸方向圧縮応力 σ_c は,

$$\sigma_{c1} = \frac{F_x}{A}, \quad \sigma_{c2} = \frac{F_y}{A}$$



第6.1-8図 鋼製柱の評価モデル

d たわみ評価

(a) ネットのたわみ量の算出

ネットの変位量と吸収エネルギーとの関係は (5.2) 式のとおり、以下の式にて導出される。

$$E_i = 2K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x (\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x)$$

ここで、 K_x 及び L_x は定数であるため、

$$\sum_{i=1}^{N_y} E_i = E_t$$

とすることで、ネットへの付加エネルギーに応じたたわみ量 δ を算出することができる。

(b) ワイヤロープたわみ量を含めたネット全体のたわみ量の算出

ワイヤロープのたわみ量は、ネット張力によりワイヤロープが放物線状に変形するとし、算出したワイヤロープに発生する張力及びワイヤロープの引張試験結果（荷重-ひずみ曲線）から変形後のワイヤロープ長さを求めることで導出する。ネットのたわみ量は中央衝突時に最大となるため、ワイヤロープたわみ量を導出する際のワイヤロープ張力は、(6.2) 式にて算出される中央衝突時の値を用いる。

$$T_1 = \frac{3}{4(2n+1)} \cdot \frac{F_a}{\sin \theta} \dots (6.2)$$

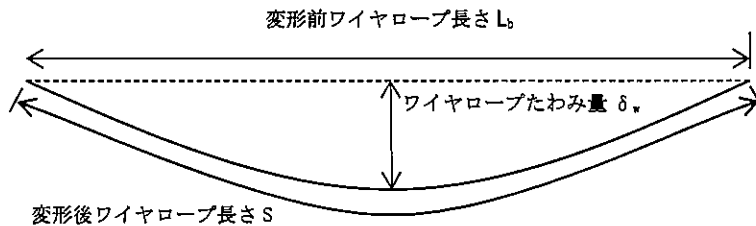
また、ワイヤロープの初期張力は小さくワイヤロープのたわみ量の算出において有意ではないため計算上考慮しない。

(6.2) 式に示す計算方法を用いて算出されるワイヤロープに発生する張力からワイヤロープのひずみ量 ε が算出される。したがって、変形によるワイヤロープの伸び量 δ' は以下のとおり算出される。

$$\delta' = L_2 \cdot \varepsilon$$

また、飛来物の衝突によりワイヤロープが第6.1-9図のとおり放物線状に変形すると、変形後のワイヤロープ長さ S は放物線の弦長の式を用いて以下のとおり表される。

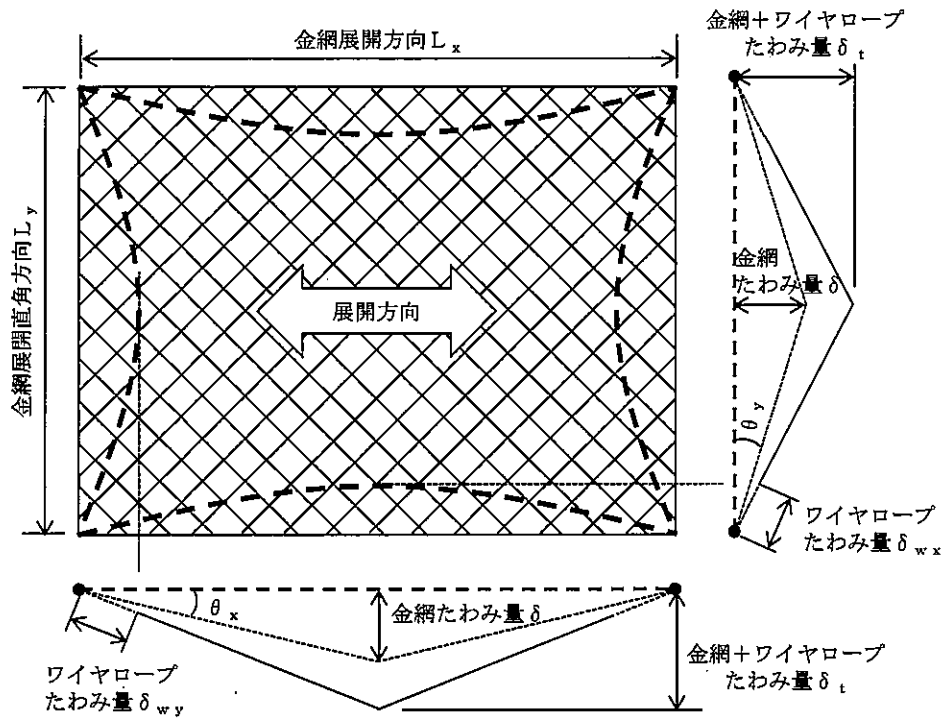
$$S = \frac{1}{2} \sqrt{L_b^2 + 16 \delta_w^2} + \frac{L_b^2}{8 \delta_w} \ln \left(\frac{4 \delta_w + \sqrt{L_b^2 + 16 \delta_w^2}}{L_b} \right)$$



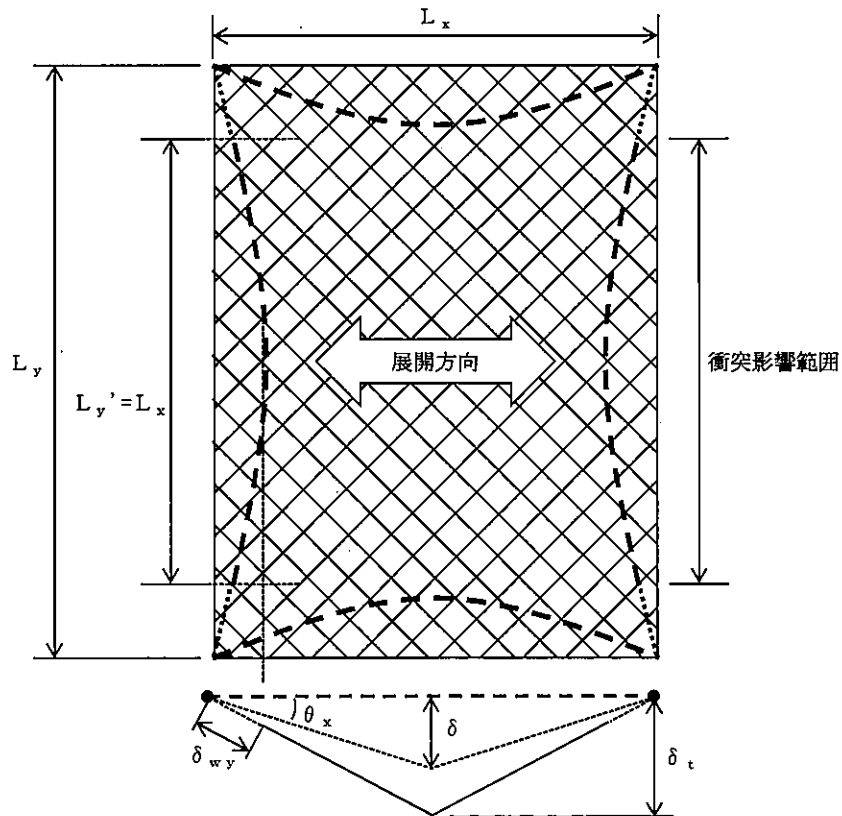
第6.1-9図 ワイヤロープ変形図

また、ワイヤロープはネットのアスペクト比により、変形形状が異なる。ネット及びワイヤロープ変形図（展開方向が長い場合）を第6.1-10図、ネット及びワイヤロープ変形図（展開方向が短い場合）を第6.1-11図に示す。

ただし、竜巻防護対策設備においては、長辺方向を展開方向とする構造としているため、すべての飛来物防護ネットで展開方向が長い場合（第6.1-10図）となる。



第6.1-10図 ネット及びワイヤロープ変形図（展開方向が長い場合）



第6.1-11図 ネット及びワイヤロープ変形図（展開方向が短い場合）

ネット展開方向と平行に配置されているワイヤロープの変形後の長さを S_x 、ネ

ット展開直角方向に配置されているワイヤロープの変形後の長さを S_y とすると、 S_x 及び S_y はそれぞれ δ_{wx} 、 δ_{wy} の関数であり、ワイヤロープ伸び量 δ' は、

$$\delta' = (S_x (\delta_{wx}) - L_x) + (S_y (\delta_{wy}) - L_y)$$

と表される。

また、ネット展開方向と平行な断面から見たたわみ量と、ネット展開方向と直交する断面から見たたわみ量は等しいことから、

$$\delta_t = \sqrt{\left(\delta_{wy} + \frac{L_x}{2\cos\theta_x}\right)^2 - \left(\frac{L_x}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\delta_{wx} + \frac{L_y}{2\cos\theta_y}\right)^2 - \left(\frac{L_y}{2}\right)^2}$$

と表され、ワイヤロープたわみ量 δ_{wx} 及び δ_{wy} を導出することができ、同時にワイヤロープたわみ量を含めたネット全体のたわみ量 δ_t が算出される。

ここで、等価剛性の導出過程を踏まえた係数1.056を考慮し、ネット全体の最大たわみ量 δ_t' は、

$$\delta_t' = \delta_t \cdot 1.056$$

となる。

7. 適用規格

添付書類「VI-1-1-1-2-1 竜巻への配慮に関する基本方針」の「2.4 適用規格」においては、竜巻の影響を考慮する施設の設計に係る適用規格を示している。これらのうち、竜巻防護対策設備の強度設計に用いる規格、基準等を以下に示す。

- ・ 鋼構造設計規準（2005改定）（(社) 日本建築学会）
- ・ 建築物荷重指針・同解説（2015改定）（(社) 日本建築学会）
- ・ 日本産業規格（JIS）
- ・ 2015年度版 建築物の構造関係技術基準解説書（国土交通省国土技術政策総合研究所他監修）
- ・ 小規模吊橋指針・同解説（(社) 日本道路協会）
- ・ 建築基準法・同施行令・同告示
- ・ Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev 8P (NEI07-13))
- ・ 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（原子力規制委員会）
- ・ タービンミサイル評価について 昭和52年7月20日
- ・ ISES7607-3 昭和50年度日本原子力研究所委託調査「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」（昭和51年10月 高温構造安全技術研究組合）
- ・ 竜巻飛来物を模擬した角管の落下衝突による鋼板の貫通評価（日本機械学会論文集, Vol. 83, Vol1851 (2017)）
- ・ 電力中央研究所報告 高強度金網を用いた竜巻飛来物対策工の合理的な衝撃応答評価手法 総合報告（平成28年3月 電力中央研究所）
- ・ 機械工学便覧 基礎編 A4材料力学（(社) 日本機械学会）
- ・ 発電用原子力設備規格 竜巻飛来物の衝撃荷重による構造物の構造健全性評価手法ガイドライン JSME S NS6-2019 2019年6月（(社) 日本機械学会）

V－別添 1－4

竜巻防護対策設備の強度計算書



新 R ① JN 許 V 00302 B

V-別添 1-4-1

飛来物防護ネットの強度計算書



(2) 安全冷却水 B 冷却塔 飛
来物防護ネットの強度計算書

目次

1.	概要	1
2.	基本方針	2
2.1	位置	2
2.2	構造概要	4
2.2.1	防護ネット	7
2.2.2	防護板	10
2.2.3	支持架構	11
2.3	評価方針	12
2.3.1	防護ネット	12
2.3.2	防護板	15
2.3.3	支持架構	16
2.4	適用規格	19
3.	防護ネットの強度評価	20
3.1	強度評価方法	20
3.1.1	記号の定義	20
3.1.2	評価対象部位	25
3.1.3	荷重及び荷重の組合せ	30
3.1.4	許容限界	35
3.1.5	評価方法	47
3.2	評価条件	67
3.2.1	荷重条件	67
3.2.2	防護ネット仕様	68
3.3	強度評価結果	81
3.3.1	吸収エネルギー評価	81
3.3.2	破断評価	84
3.3.3	たわみ評価	101

4.	防護板の強度評価	104
4.1	強度評価方法	104
4.1.1	記号の定義	104
4.1.2	評価対象部位	105
4.1.3	荷重及び荷重の組合せ	105
4.1.4	許容限界	105
4.1.5	評価方法	106
4.2	評価条件	106
4.3	強度評価結果	107
5.	支持架構の評価	108
5.1	強度評価方法	108
5.1.1	記号の定義	108
5.1.2	評価対象部位	109
5.1.3	荷重及び荷重の組合せ	110
5.1.4	許容限界	112
5.1.5	評価方法	113
5.2	評価条件	119
5.3	強度評価結果	120

1. 概要

本資料は、添付書類「V-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、屋外に設置される安全上重要な設備である竜巻防護対象施設を防護する設備である安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット（以下、「飛来物防護ネット」という。）が、想定される竜巻発生時に飛来物の衝突に対しては、防護ネットにより飛来物の運動エネルギーを吸収できるとともに、飛来物防護ネットが飛来物の貫通を防止できること及び設計荷重（竜巻）に対し、飛来物防護ネットの構造健全性を維持できる設計としていることを計算により確認するものである。

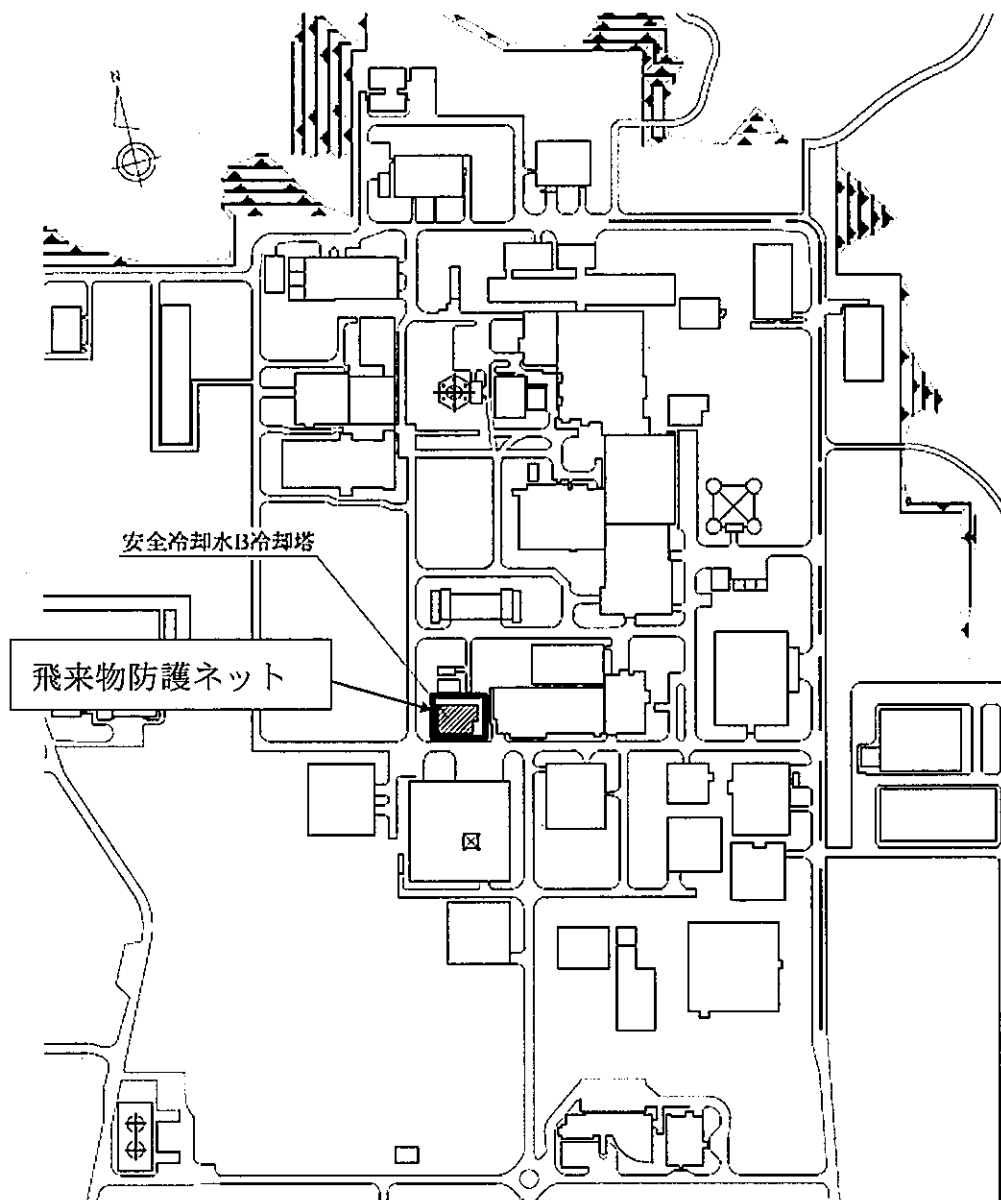
2. 基本方針

飛来物防護ネットは、添付書類「V-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「2.2 設計対象施設」及び「2.3 竜巻防護対策設備」に示す構造計画を踏まえ、「2.1 位置」及び「2.2 構造概要」を設定している。

2.1 位置

飛来物防護ネットの設置位置は、添付書類「V-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「2.2 設計対象施設」に示すとおり、安全冷却水B冷却塔に設置している。

飛来物防護ネットの配置図を第2.1-1図に示す。



第2.1-1図 飛来物防護ネットの配置図

2.2 構造概要

飛来物防護ネットの構造は添付書類「V-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「2.3 竜巻防護対策設備」に示す構造計画を踏まえて、構造を設定する。

飛来物防護ネットは、竜巻防護対象施設を竜巻による飛来物から防護するために防護ネット、防護板で覆うものであり、防護ネット、防護板とそれらを支える支持架構によって構成される。

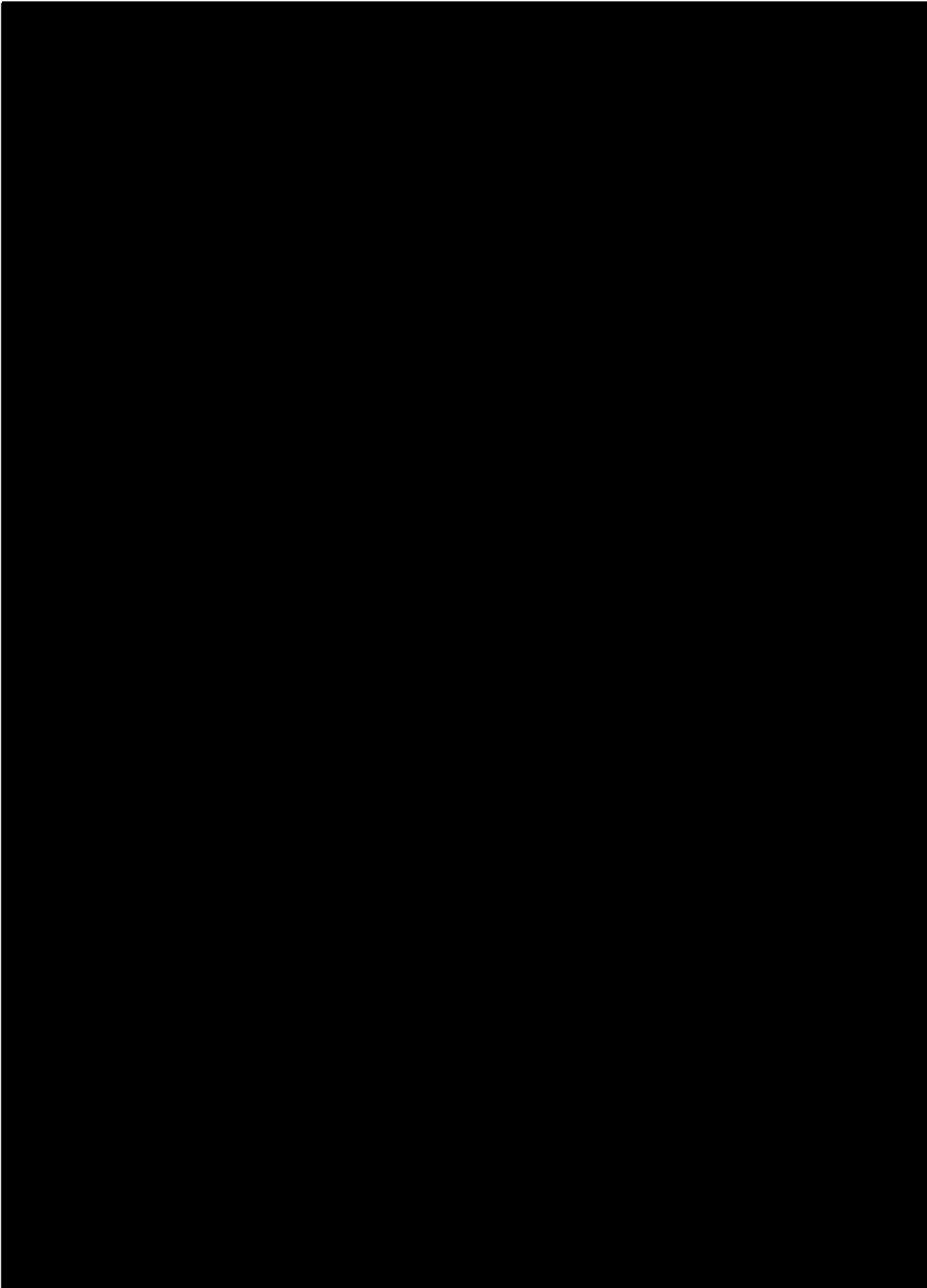
支持架構は、柱、はり及びブレースによって構成されるラーメン・トラス構造であり、溶接及びボルトにより接合される鉄骨構造物である。

また、飛来物防護ネットは杭基礎を介して支持地盤である鷹架層に支持される。

飛来物防護ネットの全景を第2.2-1図、同平面図・側面図を第2.2-2図に示す。

新 R ① JN 安工 V 00309 B

○ 新 R ① JN 安工 V 00310 B ○



2.2.1 防護ネット

防護ネットは、ネット、ワイヤロープ、ターンバックル、シャックル、接続用の冶具（隅角部固定ボルト及び取付プレート）、ネット取付金物等（ネット取付金物、押さえボルト、取付ボルト）及び鋼製枠から構成され、支持架構に取り付けられる。

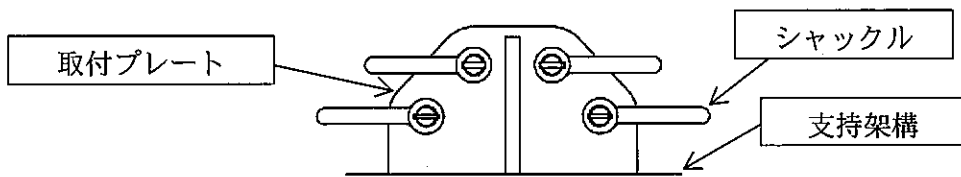
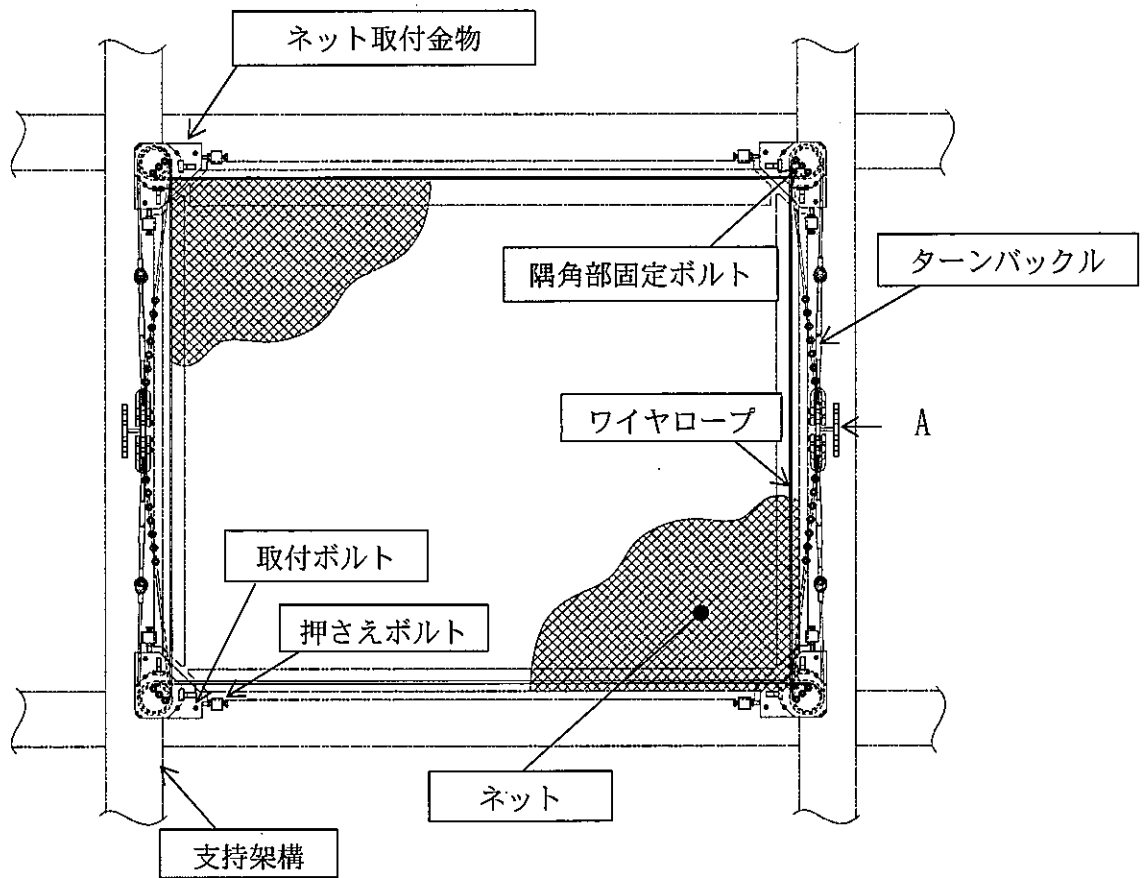
防護ネットのうちネットは、ネット端部の網目を縫うようにはわせたワイヤロープにより支持し、ワイヤロープは支持架構または鋼製枠の四隅に設置したネット取付金物等にて支持する。ワイヤロープ端部は、ターンバックル又はシャックルに接続した上で、支持架構または鋼製枠に設置した取付プレートに接続する。

防護ネットは、ネットに常時作用する荷重、積雪荷重、飛来物による衝撃荷重及び風圧力による荷重をワイヤロープ、ターンバックル、シャックル及び接続用の冶具を介して支持架構または鋼製枠に伝達する。

防護ネットのうちネットは、飛来物が衝突した際に局部的に生じる衝撃荷重に耐え、変形することにより飛来物の持つ運動エネルギーを吸収し、竜巻防護対象施設への衝突を防止するものである。ネットは、らせん状の硬鋼線を三次元的に編み込み、編み込みの方向によって主に荷重を受け持つ展開方向と展開直角方向の異方性を持っており、ネットに対してL字に張った2本のワイヤロープで支持される。

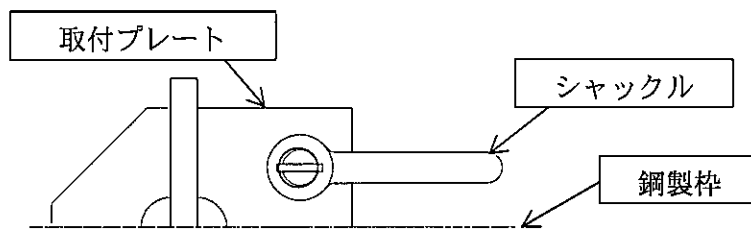
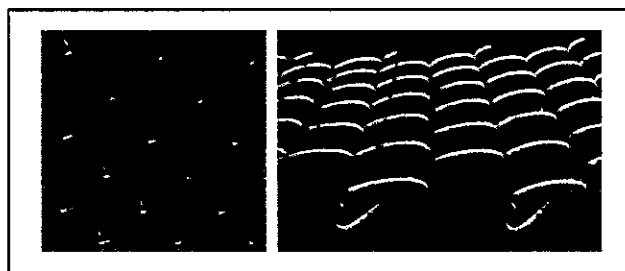
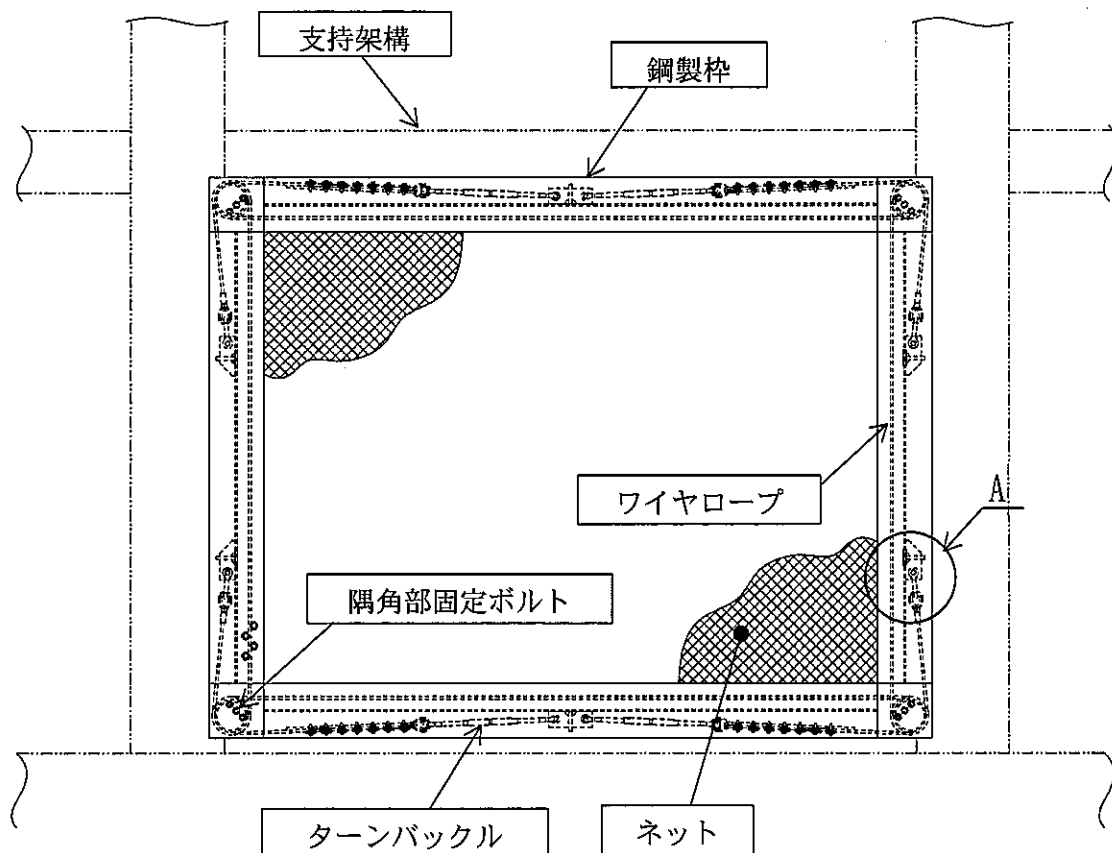
ワイヤロープは、ネット展開方向と平行に配置されるワイヤロープと、ネット展開直角方向に配置されるワイヤロープが接合されていることから、ワイヤロープの張力が均一に発生する構造となっており、ワイヤロープはネットの四隅のネット取付金物等で支持される。また、ネットは2枚重ねて敷設するため、それぞれのネットの機能が発揮されるよう、ワイヤロープや接続用の冶具等はネットごとに同じ構成にて設置し、ネット2枚の上部に目合い寸法40mmのネット（補助ネット）を1枚取り付ける。

防護ネットの概要図を第2.2.1-1図及び第2.2.1-2図に示す。



A視

第2. 2. 1-1図 防護ネットの概要図 (支持架構設置)



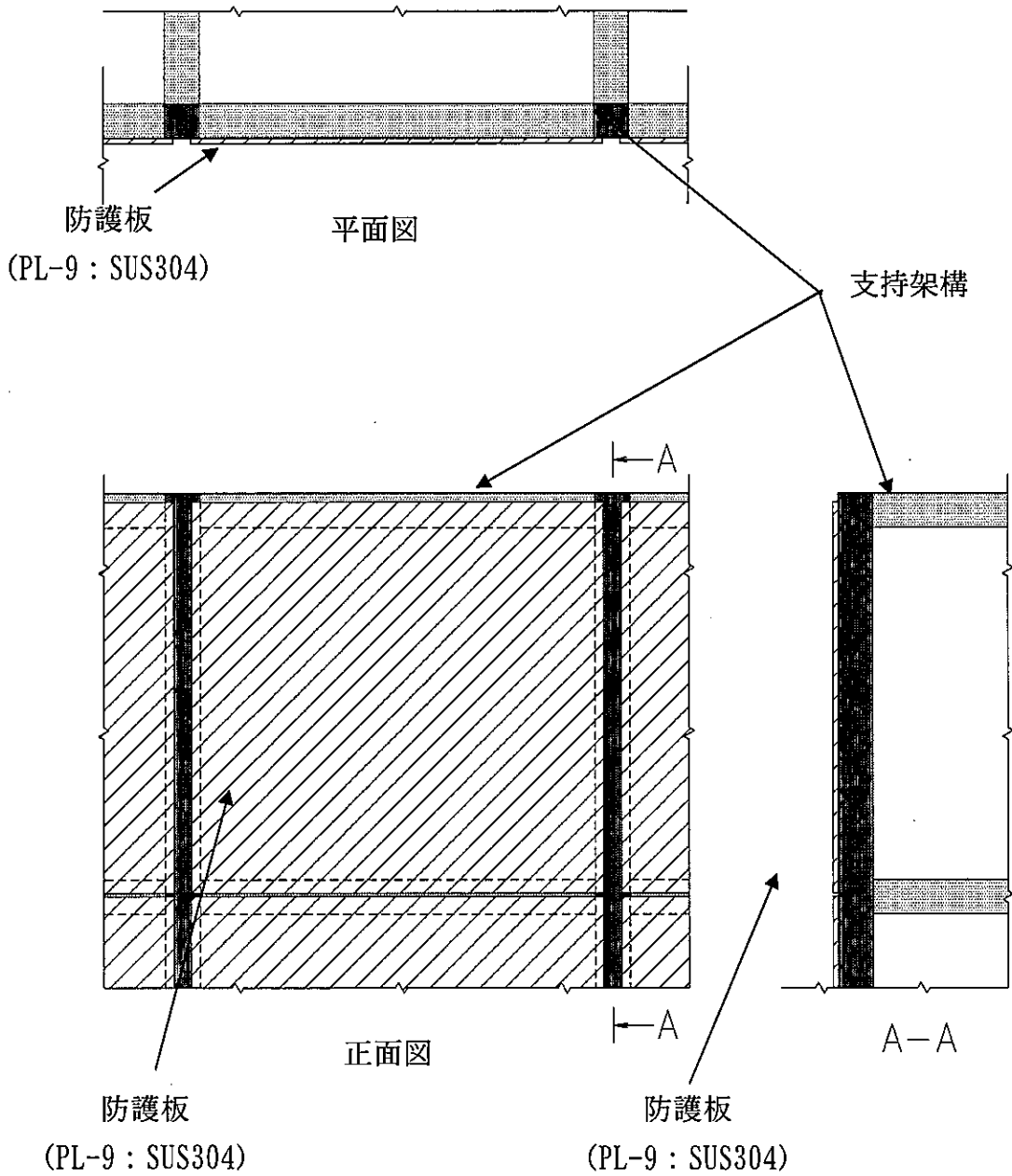
A部詳細

第2.2.1-2図 防護ネットの概要図(鋼製枠設置)

2.2.2 防護板

防護板は、竜巻発生時における飛来物衝突において飛来物の貫通を防止し得る板厚の鋼材を支持架構に取り付ける構造である。

防護板の概要図を第2.2.2-1図に示す。

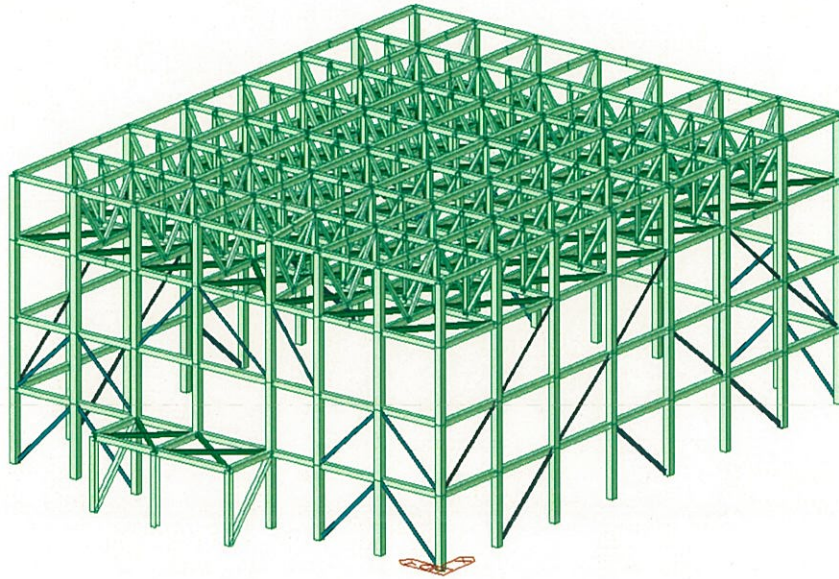


第2.2.2-1図 防護板の概要図

2.2.3 支持架構

支持架構は、柱、はり及びブレースによって構成されるラーメン・トラス構造であり、溶接及びボルトにより接合される鉄骨構造物である。

支持架構の概要図を第2.2.3-1図に示す。



第2.2.3-1図 支持架構の概要図

2.3 評価方針

2.3.1 防護ネット

防護ネットの強度計算は、添付書類「V-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重の組合せと許容限界」にて設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえて、防護ネットの評価対象部位に作用する応力等が、許容限界に収まることを「3.1.5 評価方法」に示す方法により、「3.2 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「3.3 強度評価結果」にて確認する。

防護ネットの評価フローを第2.3.1-1図に示す。

防護ネットの評価においては、その構造を踏まえて、設計竜巻荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

具体的には、設計荷重に対して、防護ネットは、内側に設置される竜巻防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物を捕捉し、竜巻防護対象施設へ衝突させないために、破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有すること及びたわみが生じても、飛来物が竜巻防護対象施設と衝突しないよう竜巻防護対象施設との離隔が確保できることを確認する。

ネットに破断が生じないことの確認として、ネットが飛来物のエネルギーを吸収できること及び飛来物の衝突箇所において、ネット目合いの破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを評価する。

また、防護ネットが飛来物を捕捉可能であることを確認するために、設計荷重に対して、ネットを支持するワイヤロープ、ターンバックル、シャックル及び接続用の治具、ネット取付金物等に破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを評価する。

評価においては、飛来物の衝突位置の影響及びネットの等価剛性の取扱いの影響を考慮した評価を実施する。

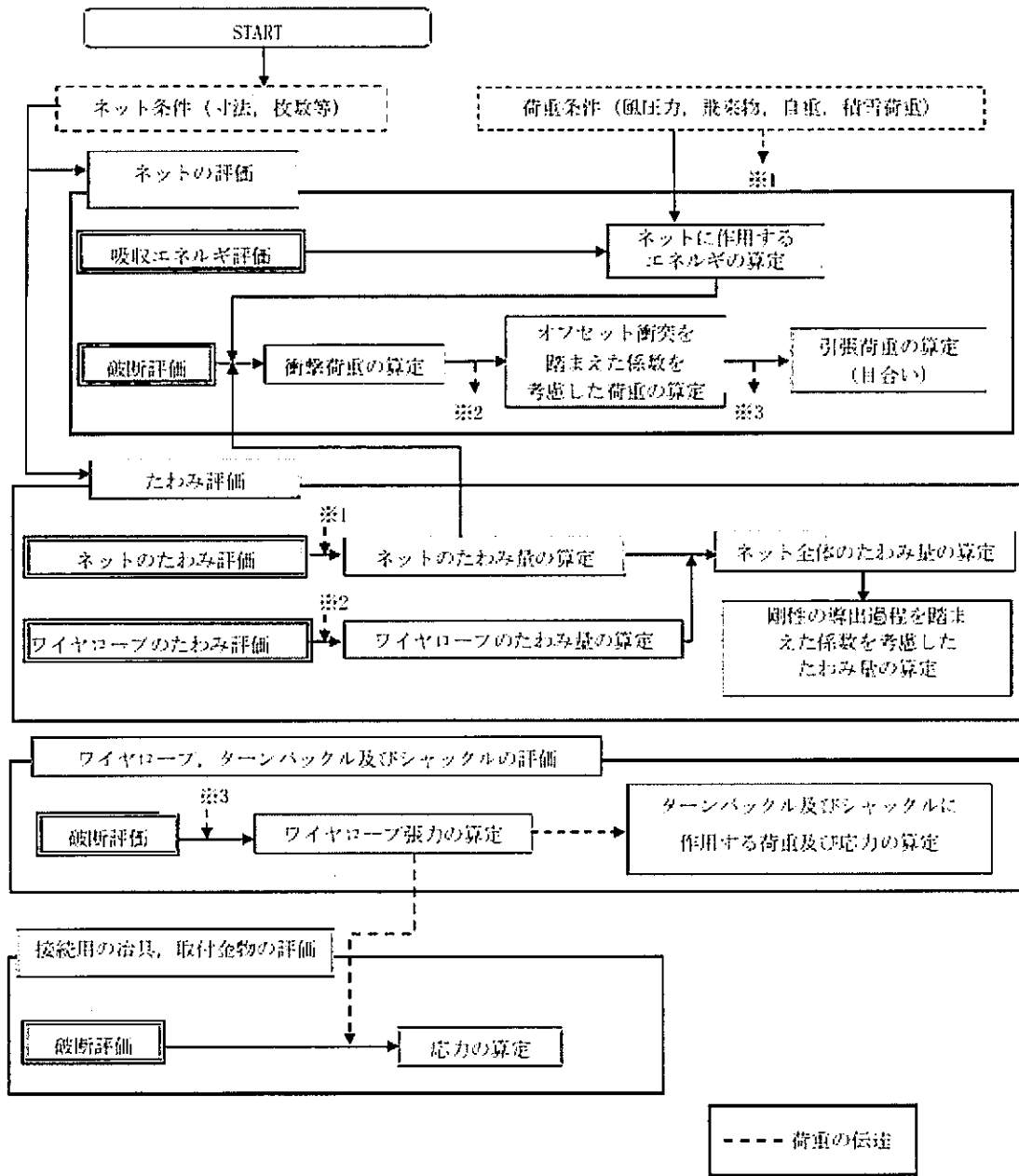
飛来物の衝突位置の影響については、評価において飛来物がネット中心に衝突する場合について評価を実施することから、中央位置からずれた位置（以下「オフセット位置」という。）に衝突する場合の影響を考慮し、ネット、ワイヤロープ、ターンバックル、シャックル、接続用の治具、ネット取付金物等の破断評価において、評価における係数を設定する。係数の設定については、「3.2 評価条件」に示す。

ネットの等価剛性については、複数回実施している引張試験の結果を用いて算出する。

等価剛性の算出の方法を考慮し、ネットの吸収エネルギー評価及びたわみ評価において、評価における係数を設定する。

係数の設定については、「3.1.4 許容限界」に示す。

ネット評価の考慮事項の選定について第2.3.1-1表に示す。



第2.3.1-1図 防護ネットの評価フロー

第2.3.1-1表 ネット評価の考慮事項の選定

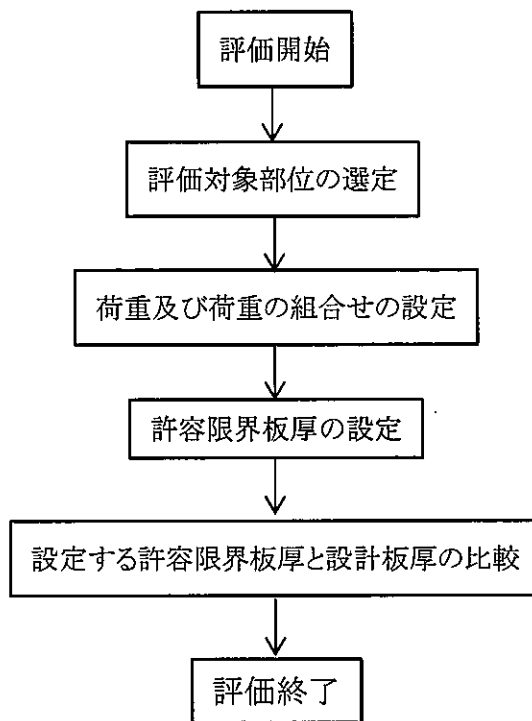
	吸収エネルギー評価	破断評価	たわみ評価
算出方法	飛来物衝突時にネットに生じるエネルギー、自重、積雪及び風圧力により生じるエネルギーを算出し、ネットに生じるエネルギーの総量を算出。	自重、積雪、飛来物による衝撃荷重及び風圧力による荷重を算出し、ネットの引張荷重、ワイヤーロープの張力及び接続用の冶具、ターンバックル、シャックル、ネット取付金物等に発生する応力を算出。	自重、積雪、飛来物による衝撃荷重及び風圧力による荷重によりネット及びワイヤーロープに生じるたわみ量を算出。
衝突位置	オフセット位置での衝突時のネットの吸収エネルギーは中央衝突時と同等であることから、オフセットによる影響はなく考慮不要。	オフセット位置での衝突時の衝撃荷重が中央衝突時より増加することを算出荷重に考慮する。	ネットのたわみ量が最大となる中央位置への衝突時のたわみ量を算出。
ネット剛性	等価剛性の算出過程の影響から定められる係数を限界吸収エネルギーに考慮する。	荷重による各部位の評価であり、ネットの等価剛性を用いた評価は行っていないため考慮不要。	等価剛性の算出過程の影響から定められる係数を飛来物による衝突によりネット本体に生じるたわみ量に考慮する。

2.3.2 防護板

防護板の強度計算は、添付書類「V-別添 1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1.3 荷重の組合せと許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、防護板を飛来物が貫通しないことを「4.1.5 評価方法」に示す方法により、「4.2 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「4.3 強度評価結果」にて確認する。

防護板の評価フローを第2.3.2-1図に示す。

評価においては、飛来物である鋼製材の貫通限界厚さが防護板の厚さ未満であることを確認する。評価には、「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会）」で用いられている式を準用する。防護板の評価における許容限界は、「4.1.4 許容限界」に示す許容限界とする。



第2.3.2-1図 防護板の評価フロー

2.3.3 支持架構

支持架構の強度計算は、添付書類「V-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重の組合せと許容限界」にて設定している荷重及び許容限界を踏まえ、支持架構の評価対象部位に作用する応力等が、許容限界内に収まることを「5.1.5 評価方法」に示す方法により、「5.2 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5.3 強度評価結果」にて確認する。

支持架構の評価フローを第2.3.3-1図に示す。

評価は、その構造を踏まえ、設計竜巻荷重とこれに組み合わせる荷重の作用方向並びに伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。

衝突評価は、竜巻の風圧力による荷重及び飛来物の衝撃荷重並びにその他の荷重に対し、支持架構部材の飛来物の衝突箇所において、支持架構部材が破断による貫通が生じないことを計算により確認する。

支持機能評価は、竜巻の風圧力による荷重及び飛来物の衝撃荷重並びにその他の荷重に対し、防護ネット及び防護板を支持する機能を保持するために支持架構に破断が生じないよう十分な余裕を持った強度が確保されていることを支持機能評価として、計算により確認する。

波及的影響評価は、竜巻の風圧力による荷重及び飛来物の衝撃荷重並びにその他の荷重に対し、支持架構が転倒し、竜巻防護対象施設に波及的影響を与えないことを確認する。なお、支持架構の波及的影響評価は、支持機能評価に包絡される。

(1) 衝突評価

飛来物の支持架構への直接衝突により、衝突箇所が破断し、貫通しないことを確認する。

(2) 支持機能評価

a. 被衝突部材の支持機能評価

飛来物が支持架構に衝突した際に、被衝突部材の端部に破断ひずみが生じないよう十分な余裕を持った強度が確保されていることを確認する。

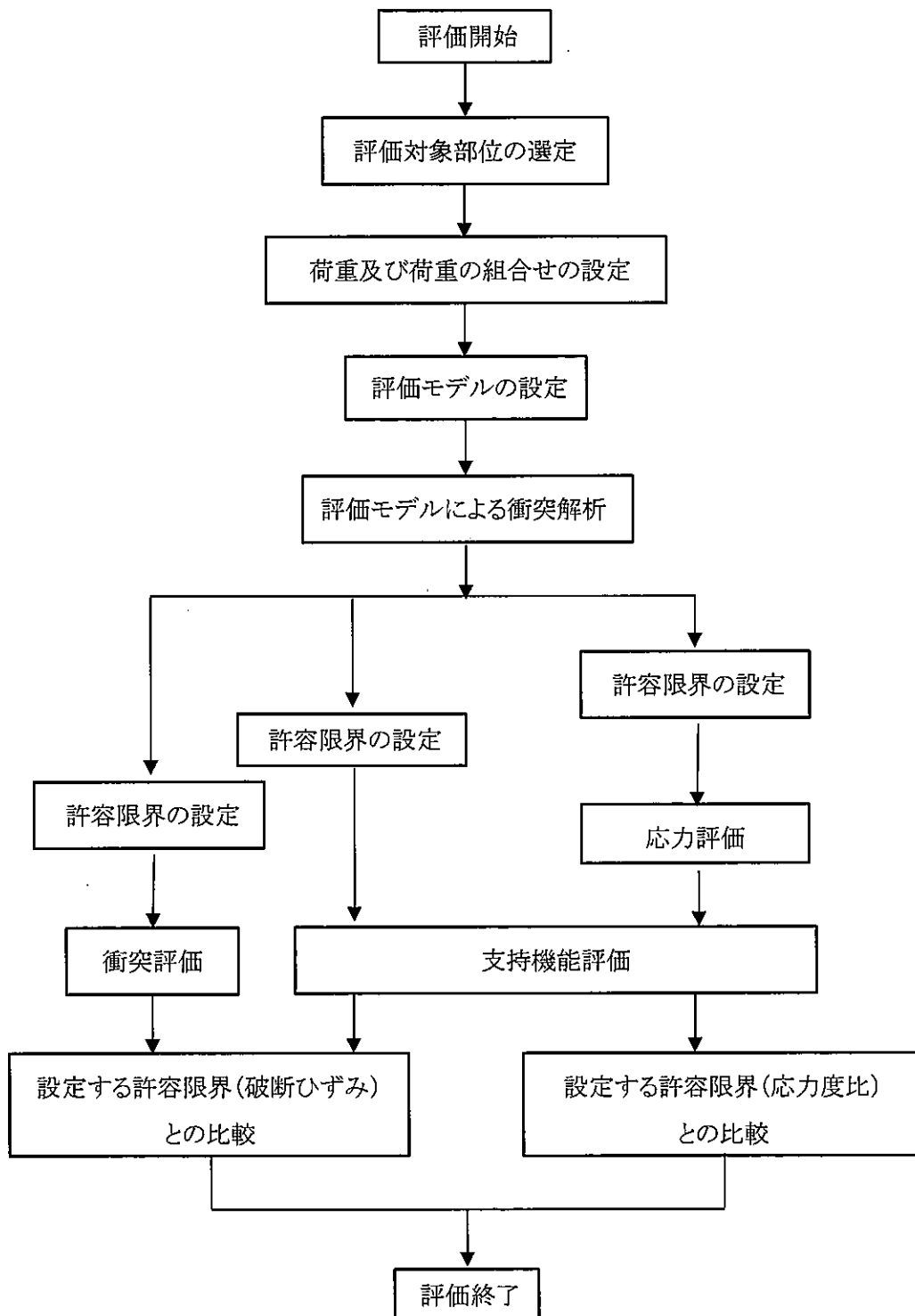
b. 支持架構全体の支持機能評価

飛来物が支持架構に衝突した際に、飛来物防護ネットの柱脚部に破断が生じないよう十分な余裕を持った強度が確保されていることを確認する。

(3) 波及的影響評価

飛来物が支持架構に衝突した際に、支持架構を構成する主要部材が破断し、支持架構全体が倒壊に至らないことを確認する。

支持架構の破断による影響評価については、「2.3.3(2) 支持機能評価」の評価で示す。



第2.3.3-1図 支持架構の評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準，指針等を以下に示す。

- ・ 鋼構造設計規準（2005改定）（（社）日本建築学会）
- ・ 日本産業規格（JIS）
- ・ 小規模吊橋指針・同解説 （（社）日本道路協会）
- ・ タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日原子炉安全専門審査会）
- ・ ISES7607-3 昭和50年度日本原子力研究所委託調査「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」（昭和51年10月 高温構造安全技術研究組合）
- ・ 竜巻飛来物を模擬した角管の落下衝突による鋼板の貫通評価
（日本機械学会論文集, Vol. 83, Vol1851 (2017)）
- ・ 発電用原子力設備規格 竜巻飛来物の衝撃荷重による構造物の構造健全性評価
手法ガイドライン JSME S NS6-2019 2019年6月 （（社）日本機械学会）
- ・ 「Eの数値を算出する方法並びに V_0 及び風力係数の数値」
（平成12年5月31日，建設省告示第1454号）
- ・ NEI07-13 Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New
Plant Designs April 2011

3. 防護ネットの強度評価

3.1 強度評価方法

3.1.1 記号の定義

飛来物防護ネットの強度評価に用いる記号を第3.1.1-1表に示す。

第3.1.1-1表 強度評価に用いる記号 (1/5)

記号	単位	定義
A_a	m^2	ネット全体が風荷重による荷重を受ける受圧面積
A_{b1}	mm^2	隅角部固定ボルト断面積
A_{b2}	mm^2	ネット取付金物等のうち取付ボルト有効断面積
A_{b3}	mm^2	ネット取付金物等のうち押さえボルト有効断面積
A_{s1}	mm^2	取付プレート（架構設置）の有効せん断面積
A_{s2}	mm^2	取付プレート（鋼製柱設置）の有効せん断面積
A	mm	ネット1目合いの対角寸法
a_s	mm	ネット1目合いの破断変位
a_w	mm	取付プレート（鋼製柱設置）溶接部ののど厚
b	mm	飛来物の端面の長辺方向寸法
c	mm	飛来物の端面の短辺方向寸法
C	-	ネットの風力係数
C_c	-	ワイヤグリップの効率
d	m	飛来物衝突時の飛来物の移動距離
E_f	kJ	飛来物の運動エネルギー
E_i	kJ	i 番目の列におけるネットの吸収エネルギー
E_{max}	kJ	ネットの限界吸収エネルギー
E_{max}'	kJ	ネットの補正限界吸収エネルギー
E_l	kJ	ネットに作用する全エネルギー
E_w	kJ	自重、積雪荷重及び風荷重によりネットに作用するエネルギー
F_a	kN	ネットが受ける最大衝撃荷重
F_a'	kN	衝突位置を考慮した飛来物衝突時にネットが受ける衝撃荷重
F_a''	kN	飛来物衝突時にネットが受ける衝撃荷重
F_{bm}	kN	飛来物衝突時のネットの許容荷重（ネット交点の破断荷重）

第3.1.1-1表 強度評価に用いる記号 (2/5)

記号	単位	定義
F_{br}	kN	ワイヤロープ破断荷重 (JIS 規格値)
F_i	kN	飛来物衝突時の <i>i</i> 番目の列における張力
F_n	kN	ネットの総交点強度
F_p	kN	ワイヤロープにより支持部に作用する荷重
F_{p1}	kN	1枚目ネットのワイヤロープにより支持部に作用する荷重
F_{p2}	kN	2枚目ネットのワイヤロープにより支持部に作用する荷重
F_w	kN	自重, 積雪荷重及び風荷重によりネットに作用する荷重
F_x	kN	ネット取付金物及び鋼製枠に作用する展開方向荷重
F_y	kN	ネット取付金物及び鋼製枠に作用する展開直角方向荷重
F_z	kN	ネット取付金物及び鋼製枠に作用する鉛直方向荷重
G	-	ガスト影響係数
H	mm	ネット取付金物の取付け面から保持管中心までの距離
K	kN/m	ネット1目合いの等価剛性
K_x	kN/m	ネット設置枚数を考慮したネット1目合いの展開方向1列の等価剛性
K_x'	kN/m	ネット1枚のネット1目合いの展開方向1列の等価剛性
L	mm	面取り長さ
L_1	mm	ネット取付金物のモーメント支点からボルトまでの距離
L_2	mm	ネット取付金物のモーメント支点から保持管中心までの距離
L_3	mm	鋼製枠下端から保持管中心までの距離
L_4	mm	鋼製枠の保持管中心から取付ボルト群中心までの距離
L_b	m	変形前のワイヤロープ長さ
L_{min}	m	防護ネットと竜巻防護施設の最小離隔距離
L_{pw}	mm	取付プレート (鋼製枠設置) 溶接部の有効長さ
L_{p1}	mm	取付プレート (架構設置) 取付け孔位置寸法
L_{p2}	mm	取付プレート (架構設置) 取付け孔位置寸法
L_{p3}	mm	取付プレート (鋼製枠設置) 縦寸法
L_{p4}	mm	取付プレート (鋼製枠設置) 横寸法
L_{p5}	mm	取付プレート (鋼製枠設置) 孔位置寸法

第3.1.1-1表 強度評価に用いる記号 (3/5)

記号	単位	定義
L_x	m	ネット展開方向寸法
L_y	m	ネット展開直角方向寸法
L_z	m	ワイヤロープの全長
m	kg	飛来物の質量
N_i	個	i 列目のネット展開直角方向目合い数
N_x	個	ネット展開方向目合い数
N_y	個	ネット展開直角方向目合い数
n	枚	ネット設置枚数
n_1	個	飛来物の衝突位置周辺のネット1枚当たりの目合い数
n_2	個	隅角部固定ボルト本数
n_3	個	ネット取付金物等のうち取付ボルト評価対象ボルト本数
P	kN	ワイヤロープの許容荷重
P_i	kN	飛来物衝突時にネットに発生する i 番目の列における張力
P_s	kN	積雪荷重
P_w	kN	ネットの自重により作用する荷重
P_1	kN	ネット取付金物等のうち取付ボルトに作用する引張荷重
Q	kN/s	衝撃荷重が時間とともに比例する際の比例係数
Q	kN/m ²	設計用速度圧
S	m	変形後のワイヤロープ長さ
S_x	m	展開方向端部のワイヤロープの弧長
S_y	m	展開直角方向端部のワイヤロープの弧長
S_w	mm	取付プレート（鋼製枠設置）溶接部の溶接脚長
T'	kN	飛来物のネットへの衝突によりn枚のネットに発生する張力の合計の最大値
T_1	kN	飛来物のネット中央への衝突により1枚のネットのワイヤロープ1本に作用する張力の最大値
T_1'	kN	衝突位置を考慮した飛来物のネットへの衝突により1枚目のネットのワイヤロープ1本に作用する張力の最大値

第3.1.1-1表 強度評価に用いる記号 (4/5)

記号	単位	定義
T_T	kN	全ワイヤロープの合計張力
t	s	飛来物衝突後の時間
t_1	s	飛来物停止までに必要な現象時間
t_2	mm	取付プレート（架構設置）の板厚
t_3	mm	取付プレート（鋼製枠設置）の板厚
V_D	m/s	設置（変更）許可を受けた竜巻の最大風速
v	m/s	飛来物の移動速度
v_i	m/s	飛来物の衝突速度
W_w	kN	風荷重によりネットに作用する荷重
X_i	m	i列目のネットの伸び
δ	m	飛来物衝突時のネットのたわみ量
δ'	m	飛来物衝突時のワイヤロープの変形による伸び量
δ_a	m	自重、積雪荷重及び風荷重による荷重によるたわみ量
δ_i	m	飛来物衝突時のi番目の列におけるネットのたわみ量
δ_{max}	m	ネットの最大たわみ量
δ_t	m	ネット変形、ワイヤたるみを考慮した対策工全体の最大たわみ量
δ'_t	m	等価剛性の導出過程を踏まえた係数を考慮した対策工全体の最大たわみ量
δ_w	m	ワイヤロープのたわみ量
δ_{wx}	m	ネット展開方向端部のワイヤロープのたわみ量
δ_{wy}	m	ネット展開直角方向端部のワイヤロープのたわみ量
ε	-	ワイヤロープの伸び率
θ	deg	飛来物衝突時のネットのたわみ角
θ_{h1}	deg	ネット展開方向に平行なワイヤロープの水平投影たわみ角
θ_{h2}	deg	ネット展開直角方向に平行なワイヤロープの水平投影たわみ角
θ_i	deg	i番目の列におけるネットたわみ角

第3. 1. 1-1表 強度評価に用いる記号 (5/5)

記号	単位	定義
θ_{max}	deg	破断時のネット変位角
θ_{w1}	deg	ネット展開方向に平行なワイヤロープのたわみ角
θ_{w2}	deg	ネット展開直角方向に平行なワイヤロープのたわみ角
θ_x	deg	飛来物衝突時の展開方向断面のネットたわみ角
θ_y	deg	飛来物衝突時の展開直角方向断面のネットたわみ角
σ_{b1}	MPa	ネット取付金物等のうち取付ボルトに発生する引張応力
σ_{b2}	MPa	ネット取付金物等のうち押さえボルトに発生する圧縮応力
ρ	kg/m ³	空気密度
τ_{p1}	MPa	取付プレート（架構設置）に発生するせん断応力
τ_{p2}	MPa	取付プレート（鋼製枠設置）に発生するせん断応力
τ_s	MPa	隅角部固定ボルトに発生するせん断応力
τ_w	MPa	取付プレート（鋼製枠設置）溶接部に発生するせん断応力
ϕ	-	ネットの充実率
ϕd_1	mm	取付プレート（架構設置）の孔径
ϕd_2	mm	取付プレート（鋼製枠設置）の孔径

3.1.2 評価対象部位

防護ネットの評価対象部位は、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

(1) ネット

設計竜巻荷重は、ネットに直接作用する。

このため、設計荷重に対する評価対象部位は、ネットとする。評価対象部位について第3.1.2-1図に示す。

(2) ワイヤロープ、ターンバックル及びシャックル

設計竜巻荷重は、ネットに作用し、ワイヤロープを介してターンバックル及びシャックルに作用するため、設計荷重に対する評価対象部位は、ワイヤロープ、ターンバックル及びシャックルとする。評価対象部位について第3.1.2-1図に示す。

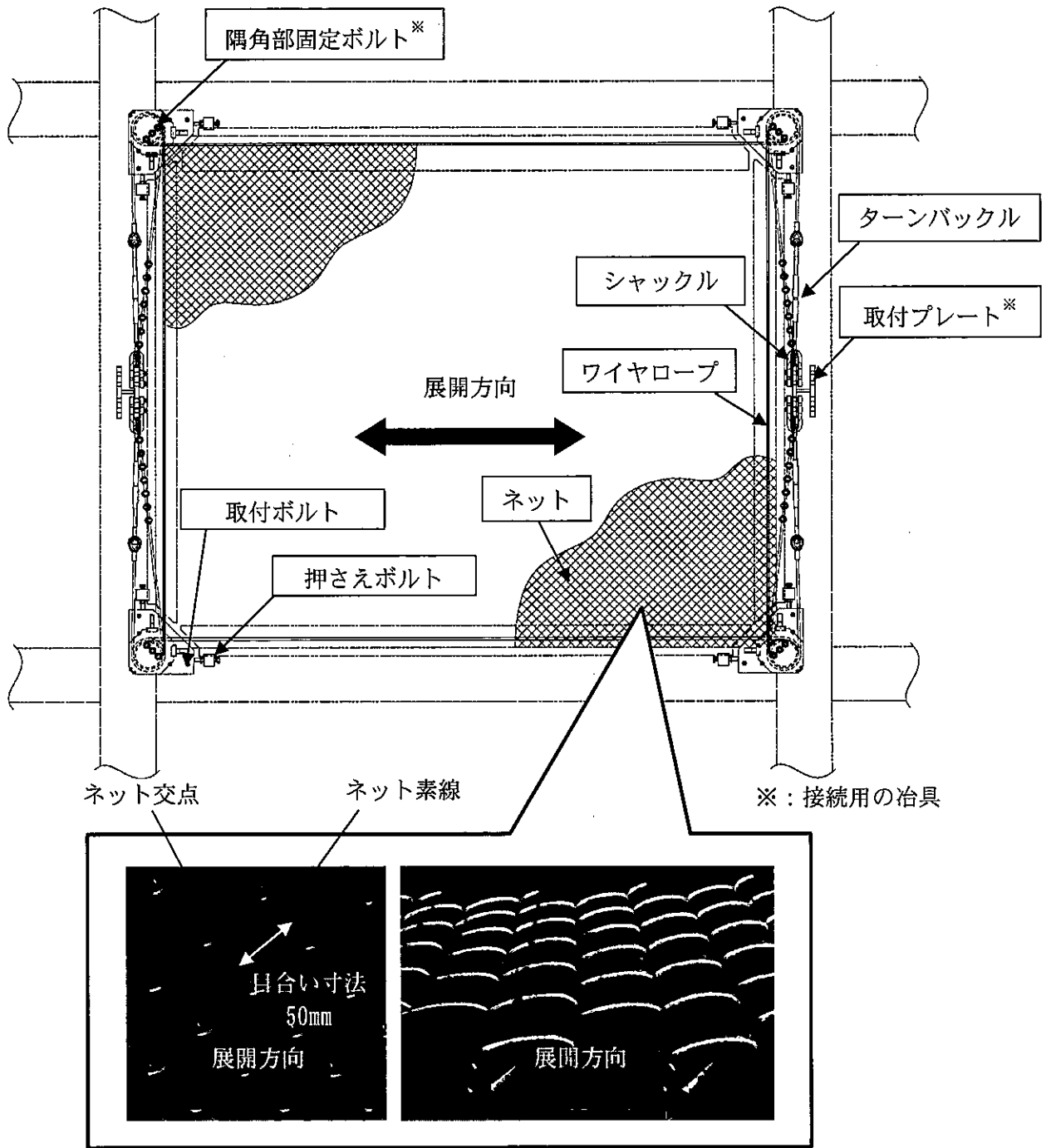
(3) 接続用の治具、ネット取付金物等

接続用の治具、ネット取付金物等の評価対象部位は、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

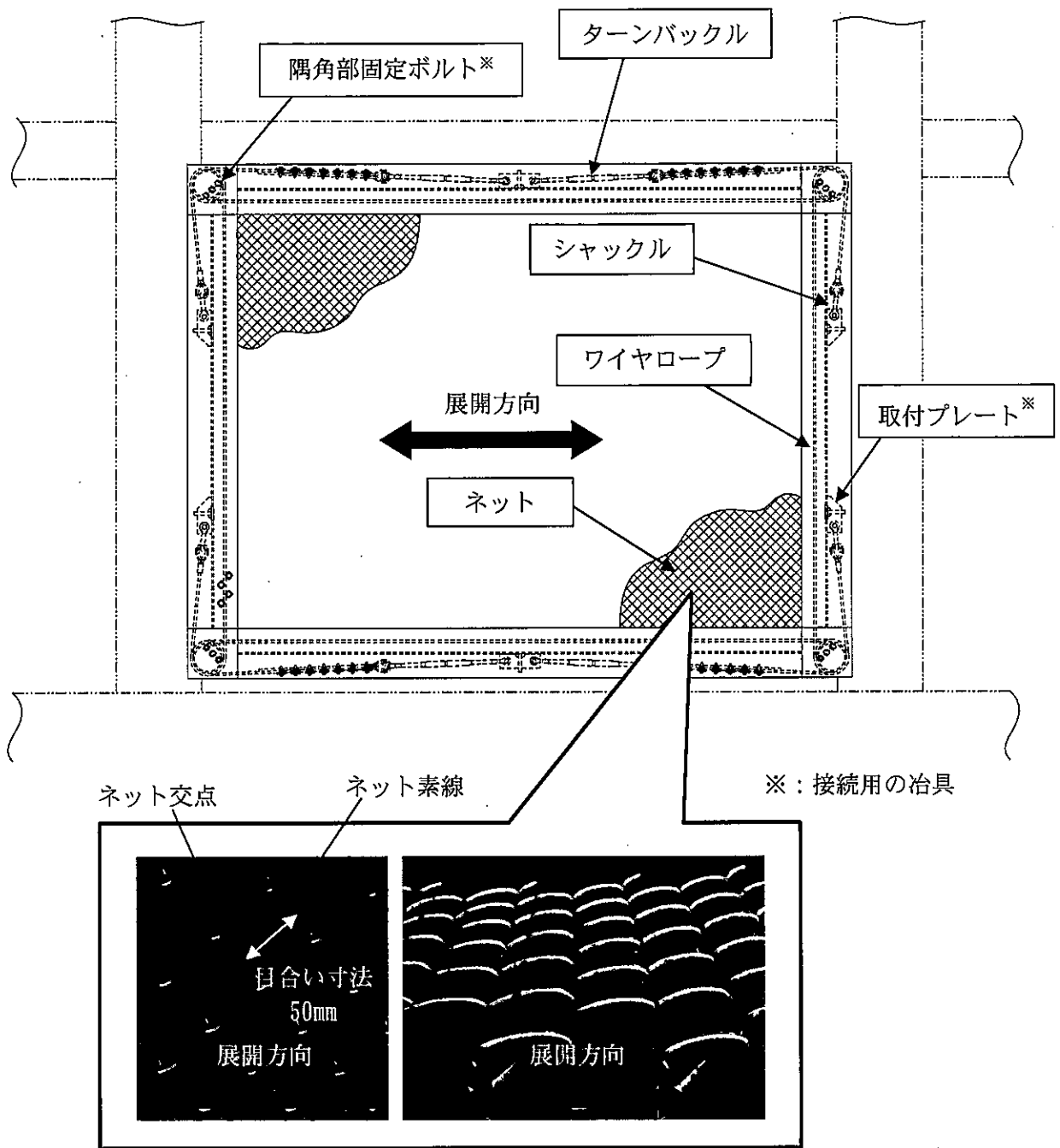
設計竜巻荷重は、ネットに作用し、ワイヤロープを介して接続用の治具、ネット取付金物等に作用するため、設計荷重に対する評価対象部位は、接続用の治具である隅角部固定ボルト、ワイヤロープの取付プレート、ネット取付金物のうち取付ボルト及び押さえボルトとする。

ワイヤロープの取付プレートの評価部位は、プレート並びにプレートと鋼製棒との溶接部を評価対象部位とする。

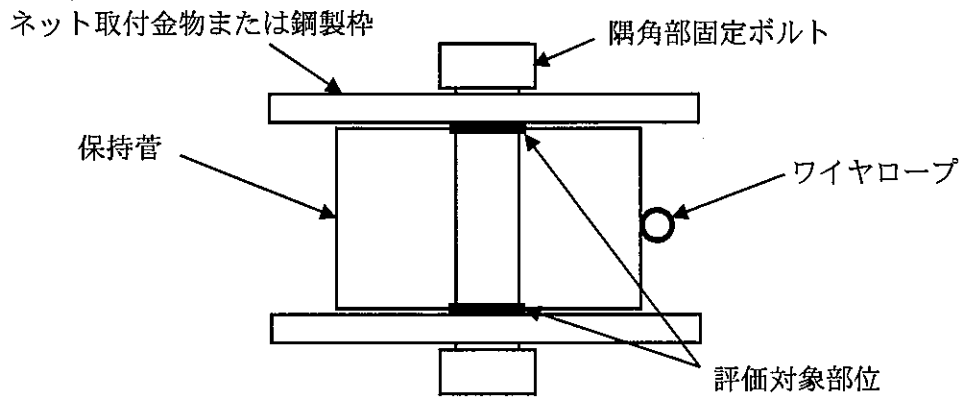
隅角部固定ボルトの評価対象部位を第3.1.2-2図、ワイヤロープの取付プレートの評価対象部位を第3.1.2-3図、ネット取付金物等の評価対象部位を第3.1.2-4図に示す。



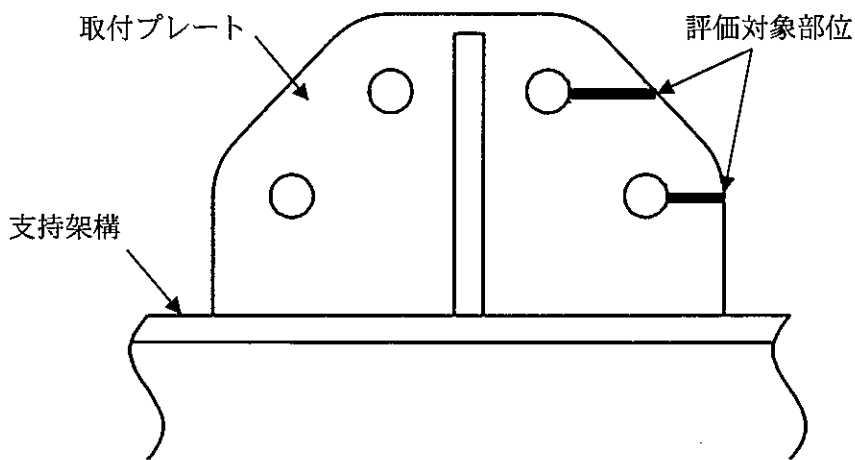
第3.1.2-1図 防護ネットの評価対象部位 (支持架構設置) (1/2)



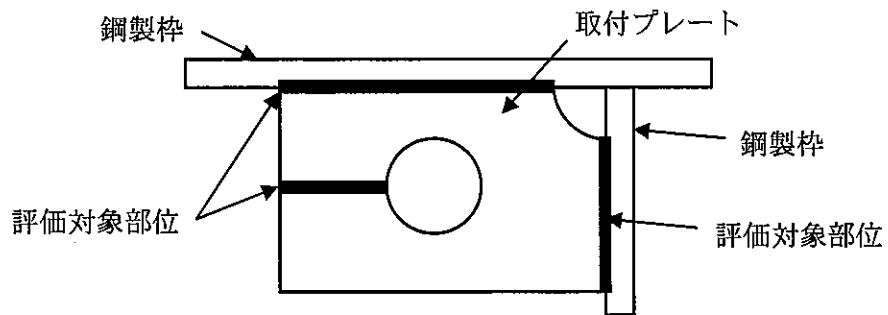
第3. 1. 2-1図 防護ネットの評価対象部位 (鋼製枠設置) (2/2)



第3.1.2-2図 隅角部固定ボルトの評価対象部位

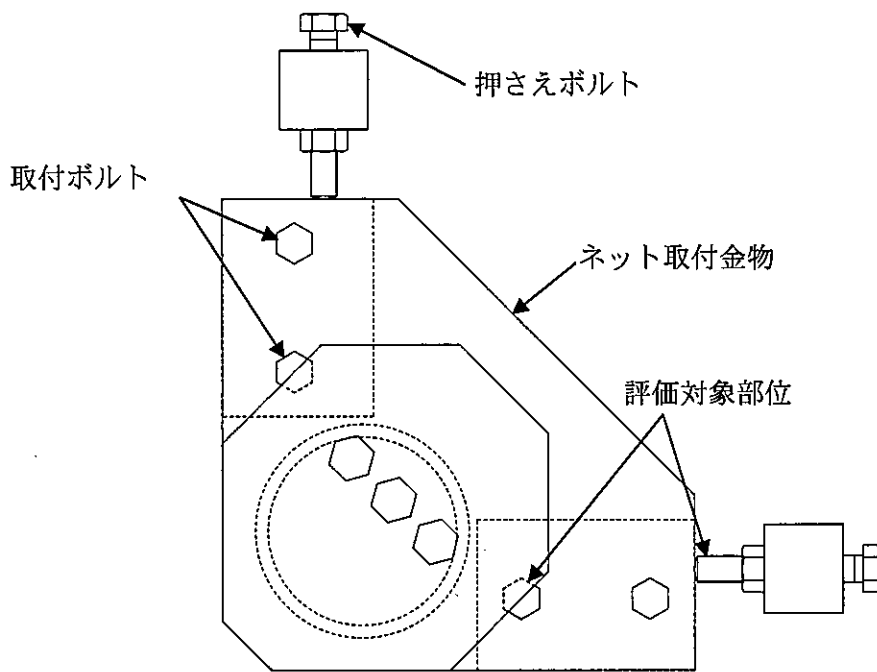


(i) 支持架構設置



(ii) 鋼製枠設置

第3.1.2-3図 ワイヤロープの取付プレートの評価対象部位



第3.1.2-4図 ネット取付金物等の評価対象部位

3.1.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、添付書類「竜巻防護に関する施設の評価方針」の「4. 荷重の組合せと許容限界」に示している、荷重及び荷重の組合せを用いる。

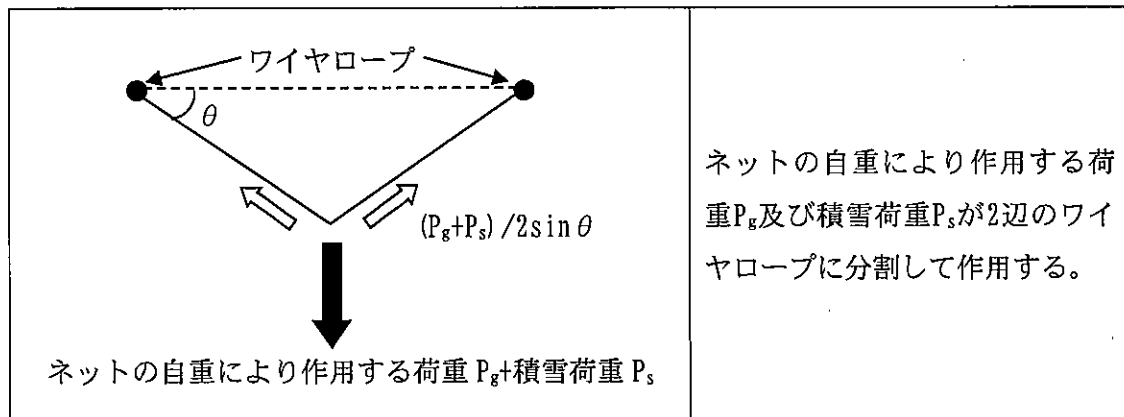
(1) 荷重の設定

a. 固定荷重

固定荷重としてネットの自重及び積雪荷重を考慮する。第3.1.3-1表にワイヤロープへのネットの自重により作用する荷重及び積雪荷重の負荷方法を示す。

ワイヤロープへのネットの自重により作用する荷重及び積雪荷重に比べ、ワイヤロープ、ターンバックル、シャックル、接続用の冶具、ネット取付金物等の自重及び積雪荷重は十分に小さいことから考慮しない。

第3.1.3-1表 ワイヤロープへのネットの自重により作用する荷重及び積雪荷重の負荷法



b. 設計竜巻荷重

設計竜巻荷重として、飛来物の衝撃荷重及び風圧力による荷重を考慮する。また、ネットは閉じた空間にないため、気圧差による荷重は考慮しない。

飛来物の衝撃荷重としては、衝撃荷重が大きくなる向きで飛来物がネットに衝突することを想定する。

(a) 風荷重 (W_w)

$$W_w = \frac{q \cdot G \cdot C \cdot A_a \cdot \phi}{1000}$$

$$q = \frac{1}{2} \rho V_D^2$$

(b) 飛来物の衝撃荷重

破断評価においては、飛来物の衝撃荷重は以下のとおり算出する。

ネットの飛来物の衝撃荷重 F_a'' は時間とともに比例的に増加すると仮定すると、
衝撃荷重 F_a'' は以下のとおり算出される。

$$F_a'' = Qt \cdots \textcircled{1}$$

したがって、飛来物の移動速度 v は式①の衝撃荷重 F_a'' から、以下のとおり算出される。

$$\begin{aligned} v &= -\frac{1}{m} \int_0^t F_a'' dt \\ &= -\frac{Qt^2}{2m} + v_1 \cdots \textcircled{2} \end{aligned}$$

さらに、飛来物の移動距離 d は、式②の飛来物の移動速度 v から以下のとおり算出される。

$$\begin{aligned} d &= \int_0^t v dt \\ &= -\frac{Qt^3}{6m} + v_1 t \cdots \textcircled{3} \end{aligned}$$

飛来物が衝突しネットのたわみが最大になる時間 t_1 におけるネットの最大変位は δ 、飛来物の移動速度は $v = 0$ であるから、式②、③より、

$$Qt_1^2 = 2mv_1 \cdots \textcircled{4}$$

$$\delta = -\frac{Qt_1^3}{6m} + v_1 t_1$$

上記2式を連立し、

$$\delta = \frac{2}{3} v_1 t_1$$

よって,

$$t_1 = \frac{3}{2v_1} \cdot \delta \quad \dots \textcircled{5}$$

以上より, 時間 t_1 における飛来物の衝撃荷重 F_a は式①, ④より,

$$F_a = \frac{2mv_1}{t_1}$$

さらに, 式⑤と連立し,

$$F_a = \frac{4mv_1^2}{3 \cdot \delta} \quad \dots \textcircled{6}$$

また, 時間 t_1 における飛来物の衝突によりネットに作用するエネルギー E_f は, 衝突時の飛来物の運動エネルギーとして, 以下より求められる。

$$E_f = \frac{1}{2} \cdot mv_1^2 \quad \dots \textcircled{7}$$

したがって, 式⑥, ⑦より,

$$F_a = \frac{8E_f}{3 \cdot \delta} \quad \dots \textcircled{8}$$

式⑧にたわみ評価で算出する飛来物が衝突する場合のネットの最大たわみ量 δ を代入し, F_a を算出する。

(2) 荷重の組合せ

a. ネット

ネット2枚の上部に設置する補助ネットを考慮したネットの自重、積雪荷重及びに飛来物がネットに衝突する場合の飛来物の衝撃荷重並びに風圧力による荷重を組み合わせた荷重をネットに作用する荷重として設定する。

b. ワイヤロープ、ターンバックル及びシャックル

飛来物がネットに衝突する場合にワイヤロープ等に作用する荷重は、ネットからワイヤロープに伝達され、その荷重がターンバックル及びシャックルを介して接続用の冶具に伝達されることから、ネットに作用する荷重を評価対象部位であるワイヤロープ、ターンバックル及びシャックルに作用する荷重として設定する。

ワイヤロープ、ターンバックル及びシャックルに作用する自重、積雪荷重及び風圧力による荷重は、ネットに作用する荷重に比べて十分小さいことから考慮しない。

c. 接続用の冶具、ネット取付金物等

飛来物がネットに衝突する場合にネット取付部へ作用する荷重は、ネットからワイヤロープを介して接続用の冶具、ネット取付金物等に伝達されることから、ワイヤロープからの荷重を評価対象部位である接続用の冶具のうち隅角部固定ボルト及び取付プレート、ネット取付金物等に作用する荷重として設定する。

接続用の冶具、ネット取付金物等に作用する自重、積雪荷重及び風圧力による荷重は、ネットに作用する荷重に比べて十分小さいことから考慮しない。

吸収エネルギー評価、破断評価及びたわみ評価における、ネット、ワイヤロープ、ターンバックル、シャックル、接続用の冶具、ネット取付金物等に作用する荷重及びその組合せを第3.1.3-2表から第3.1.3-4表に示す。

第3.1.3-2表 吸収エネルギー評価における荷重及びその組合せ

設備名称	考慮する荷重			
	自重	積雪荷重	飛来物の衝撃荷重	風圧力による荷重
飛来物防護ネット	○	○	○	○

<凡例> ○：考慮する，－：考慮しない

第3.1.3-3表 破断評価における荷重及びその組合せ

設備名称	評価対象部位	考慮する荷重			
		自重	積雪荷重	飛来物の衝撃荷重	風圧力による荷重
飛来物防護ネット	ネット	○	○	○	○
	ワイヤロープ ターンバックル シャックル	－	－	○	－
	接続用の冶具	－	－	○	－
	ネット取付金物等	－	－	○	－

<凡例> ○：考慮する，－：考慮しない

第3.1.3-4表 たわみ量評価における荷重及びその組合せ

設備名称	評価対象部位	考慮する荷重			
		自重	積雪荷重	飛来物の衝撃荷重	風圧力による荷重
飛来物防護ネット	ネット	○	○	○	○
	ワイヤロープ	－	－	○	－

<凡例> ○：考慮する，－：考慮しない

新 R ① JN 安ユ V 00338 D

3.1.4 許容限界

許容限界は、添付書類「竜巻防護に関する施設の評価方針」の「4. 荷重の組合せと許容限界」にて設定している許容限界に従って、「3.1.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮して設定する。

吸収エネルギー評価、破断評価及びたわみ評価の許容限界を以下に示す。

(1) 吸収エネルギー評価

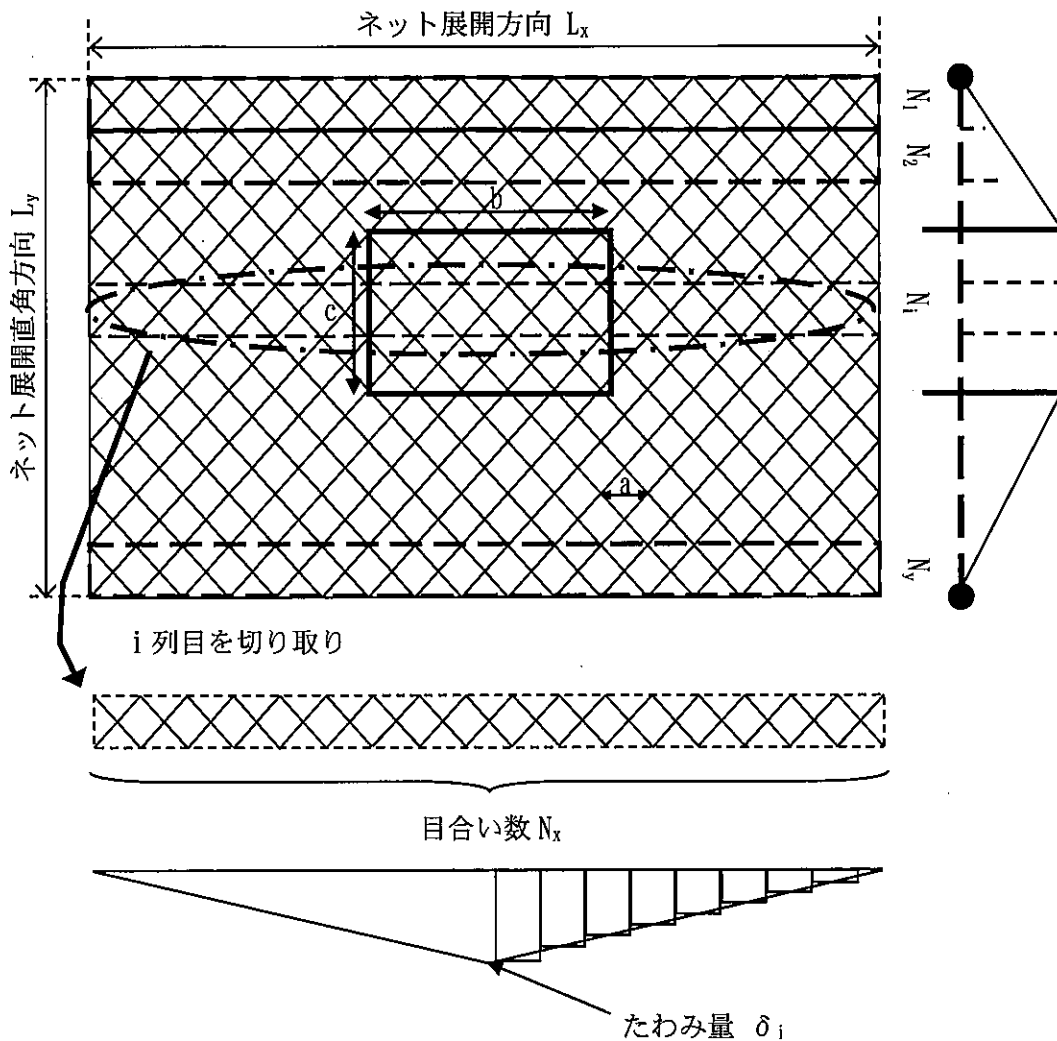
吸収エネルギー評価においては、計算により算出するネットの限界吸収エネルギーがネットに作用するエネルギー以上であることにより、ネットが破断しないことを確認する。ネット1目合いの要素試験の結果から得られる目合い展開方向の限界伸び量によりネットの最大変形角が定まり、ネット最大変形角における吸収エネルギーがネットの有する限界吸収エネルギー E_{max} となる。 E_{max} に係数を考慮した値を吸収エネルギー評価の許容限界とする。

限界吸収エネルギーは、複数枚を重ね合わせたネットを一体として扱ったモデルにて算出する。また、ネットの変形及び吸収エネルギーの分布を考慮したオフセット衝突位置での吸収エネルギー評価の結果、一般財団法人 電力中央研究所（以下、「電中研」という。）の報告書を参照して、ネット最大たわみ時のネットの全長は飛来物のネットへの衝突位置によらずネット最大たわみ時展開方向の長さで一定であり、ネットに発生する張力も一定となることから、飛来物のネットへの衝突位置によらずネットから飛来物への反力も同等となり、オフセット位置への飛来物の衝突時の吸収エネルギーは中央衝突時と同等となる。したがって、吸収エネルギー評価では中央衝突の場合にて評価を行う。

さらに、設計条件の設定において等価剛性の算出方法の影響を裕度として考慮する。評価に用いる等価剛性は、引張試験による荷重-伸び曲線から各々の最大荷重発生時までの最大エネルギーを算出し、これらの平均値と等価な剛性を用いており、平均値と実測値との間で最大5.6%の差があることから、本影響を係数として考慮する。吸収エネルギー評価においては、等価剛性の影響を考慮した係数を限界吸収エネルギーが小さくなるように考慮する。

最大吸収エネルギーは、ネット1目合いの展開方向の1列の等価剛性、展開方向寸法及びたわみ量から、以下のとおり算出される。

吸収エネルギー評価におけるネットのモデル図を第3.1.4-1図に示す。



第3.1.4-1図 吸収エネルギー評価におけるネットのモデル図

第3.1.4-1図に示すとおりネットの展開方向に1目合いごとに「 」で囲った形に帯状に分割し、 N_1 から N_y までの各列が分担するエネルギーを各列のたわみ量から算定し、それらを積算することによりネットの吸収するエネルギーを算出し、ネットが吸収可能な限界吸収エネルギーを算出する。

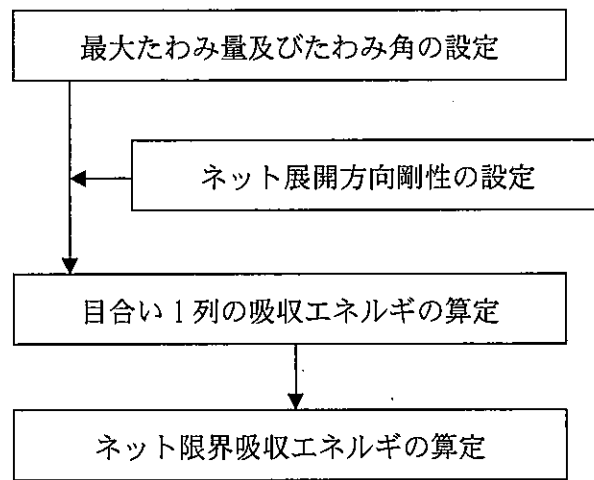
ただし、中央部の最大たわみ量が発生する列数は、飛来物の寸法及びネット目合いの対角寸法から算出されるネット展開直角方向目合い列数を考慮して設定する。飛来物の端部寸法 ($b \times c$) 及びネット目合いの対角寸法 a を考慮し、最大たわみが発生する場合のネット展開直角方向目合い列数を以下のとおり算出する。ネットの吸収エネルギーが小さくなるよう、目合い列数の算出に用いる飛来物の寸法とし

て値の小さい寸法cを適用し，最大たわみが生じる目合い列数を少なくすることにより，限界吸収エネルギー量が小さくなるように評価する。

$$\text{ネット展開直角方向目合い列数} = \frac{c}{a}$$

評価モデルとしては，展開方向に1目合いごとに帯状に分割するモデルとしており，限界吸収エネルギー量が小さく算出されるよう，三角形モデルとして評価を実施する。

吸収エネルギー評価の許容限界の算定フローを第3. 1. 4-2図に示す。

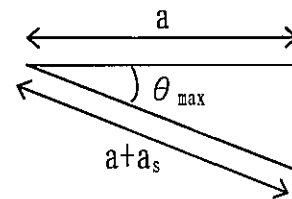


第3. 1. 4-2図 吸収エネルギー評価の許容限界の算定フロー

ネット1目合いの最大伸び量は，電中研報告書のネット目合いの引張試験から1目合いの最大破断変位が求められ，そこから算出する最大たわみ角から，飛来物が衝突した際の列の最大たわみ量 δ_{max} は次式により算定される。

$$\delta_{max} = \frac{L_x}{2} \cdot \tan(\theta_{max})$$

$$\theta_{max} = \cos^{-1} \left(\frac{a}{a+a_s} \right)$$



ネットを構成するネットの展開方向の目合い数 N_x は，ネット展開方向寸法 L_x 及びネット1目合いの対角寸法 a から求める。展開直角方向の目合い数 N_y は，ネット展開直角方向寸法 L_y 及びネット1目合いの対角寸法 a から求める。ネットを構成する1目

新 R ① JN 安ユ V 00342 C

合いはそれぞれKの等価剛性を持っているため、1列当たりバネ定数Kを持つバネを N_x 個直列に接続したものと考えることができる。

そのため、1列当たりの剛性 K_x' は、

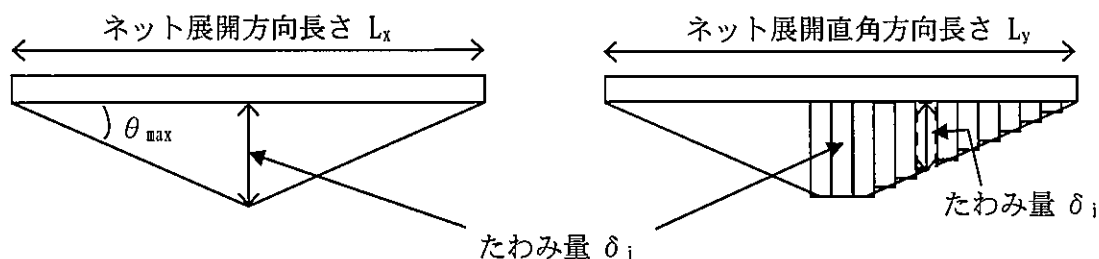
$$N_x = \frac{1000L_x}{a}, \quad N_y = \frac{1000L_y}{a}$$

$$\text{ネット展開方向剛性 } K_x' = \frac{K}{N_x}$$

となる。ただし、 N_x 、 N_y の算出において限界吸収エネルギーの値が小さくなるように N_x は保守的に切り上げ、 N_y は保守的に切り捨てた値を用いる。また、補助ネットはネット0.5枚相当のエネルギー吸収能力があるため、ネット設置枚数を考慮したネット展開方向剛性 K_x は、次式により算出される。

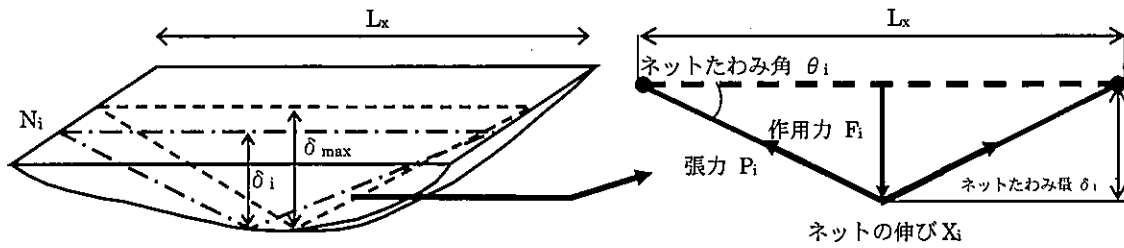
$$K_x = K_x' \cdot (n+0.5)$$

飛来物が衝突しなかった列のたわみ量 δ_i は、最大たわみ量 δ_{max} からネット端部のたわみ量0までの間を、非接触の列の数の分だけ段階的に減少していくと考える。ネットの最大たわみ量と最大たわみ角を第3.1.4-3図に示す。



第3.1.4-3図 衝撃荷重によるネットのたわみ

ネットに飛来物が衝突した際のネットにかかる張力を、ネットの剛性及びネットの伸び量から算出する。ネットに作用する力のつり合いを第3.1.4-4図に示す。



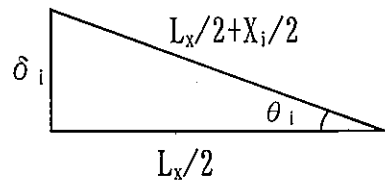
第3.1.4-4図 ネットに作用する力のつり合い

i番目の列におけるネットの張力 P_i は、飛来物の衝突位置の左右を分割して考えると、伸び量は $\frac{X_i}{2}$ ，剛性は $2K_x$ となることから、

$$P_i = 2K_x \cdot \left(\frac{X_i}{2}\right) = K_x \cdot X_i$$

となる。また、作用力 F_i は変位置とたわみ量の関係から、

$$\begin{aligned} F_i &= 2P_i \cdot \sin(\theta_i) \\ &= 2K_x \cdot X_i \cdot \sin(\theta_i) \\ &= 2K_x \cdot L_x \cdot (\tan(\theta_i) - \sin(\theta_i)) \\ &= 4K_x \cdot \delta_i \cdot \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2}}\right) \dots \textcircled{9} \end{aligned}$$



ネットに飛来物が衝突した際のネットにかかる作用力 F_i を積分することによりi番目の列における吸収エネルギー E_i を次式に示す。

$$\begin{aligned} E_i &= \int_0^{\delta_i} F_i d\delta_i \\ &= \int_0^{\delta_i} 4K_x \cdot \delta_i \cdot \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2}}\right) d\delta_i \\ &= 2K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x (\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x) \dots \textcircled{10} \end{aligned}$$

以上から、n枚のネット及び1枚の補助ネットを考慮した限界吸収エネルギー E_{max} は、各列の吸収エネルギー E_i を第1列から第 N_i 列まで積算することにより求められる。

$$E_{\max} = \sum_{i=1}^{N_y} E_i$$

$$= \sum_{i=1}^{N_y} \left(2K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \left(\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \right) \dots \textcircled{11}$$

飛来物衝突時にネットに生じるエネルギー並びに自重、積雪荷重及び風圧力により生じるエネルギーの総量を算出し、等価剛性の算出方法の影響から定められる係数を考慮したn枚のネット及び1枚の補助ネットから算出される限界吸収エネルギーを E_{\max}' とする。

係数としては、上記を踏まえ $\frac{1}{1.056}$ 倍と定める。

したがって、限界吸収エネルギーの許容限界は、以下のとおりである。

$$E_{\max}' = \frac{1}{1.056} E_{\max}$$

(2) 破断評価

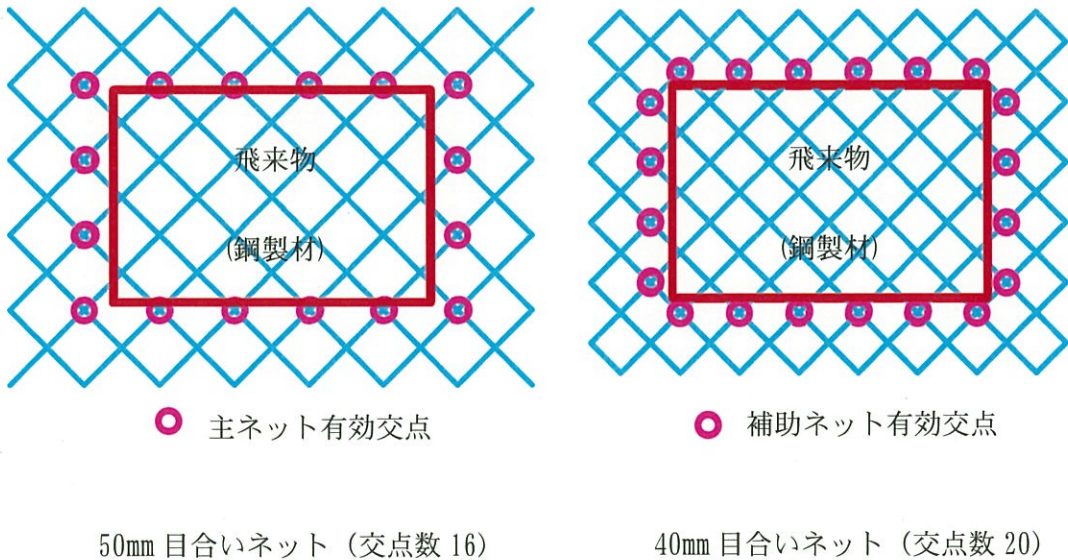
a. ネット

破断評価においては、計算により算出するネットに作用する荷重がネットの素材の持つ破断強度以下であることにより、ネットに破断が生じないように十分な余裕を持った強度を有することを確認する。

破断評価モデルを第3.1.4-5図に示す。ネット構造及び飛来物の大きさを考慮し、衝突位置周辺の交点数が最小となるモデル化を行う。衝突位置周辺の交点数はネット1枚あたり16点（主ネット）及び20点（補助ネット）となる。

ネットは、飛来物の衝突に対し、塑性変形することでエネルギーを吸収し、飛来物を捕捉することから、ネット交点の破断試験結果から算出したネット1目合いに作用する引張荷重を安全側に整理したものと全有効交点数から算出される総交点強度を許容限界とする。具体的には、引張強度評価においては、ネット交点に作用する引張荷重を算出するため、電中研報告書を参照してネット交点の引張試験に基づいたネット交点の破断荷重 F_{50} 及び F_{40} に全有効交点数を乗じた総交点強度 F_n を許容限界とする。なお、破断評価では補助ネットの交点数も考慮する。

$$F_n = F_{50} \times 16 \times 2 + F_{40} \times 20 \times 1$$



第3.1.4-5図 破断評価モデル図

b. ワイヤロープ、ターンバックル及びシャックル

ワイヤロープは、ネットと一体となって飛来物を捕捉するため、ネットと同様に塑性変形を許容することから、破断荷重を許容限界とする。具体的な破断荷重は、ネットメーカーが実施した引張試験にて確認した破断荷重よりも保守的な値であるJISに規定されている破断荷重を許容限界とする。ワイヤロープについては、その端部にワイヤグリップを設置しており、その効率 C_c に基づき、許容限界を第3.1.4-1表のように設定する。

ターンバックル及びシャックルは、破断しなければネットを設置位置に保持することができ、飛来物を捕捉可能である。したがって、ワイヤロープの張力に対し、設計荷重が十分な裕度を有していることを確認する。ターンバックルについては、破断荷重よりも保守的な値である規格値に対して1.5倍した短期許容荷重を許容限界とし、またシャックルについては、メーカー保証値を許容限界とし、第3.1.4-2表のように設定する。

第3.1.4-1表 ワイヤロープの破断評価の許容限界

評価対象部位	規格値	許容限界	備考
ワイヤロープ	F_{br}	$C_c \cdot F_{br}$	ワイヤグリップの効率を考慮

第3.1.4-2表 ターンバックル及びシャックルに適用する許容限界

評価対象部位	規格値	許容限界
ターンバックル	86.8kN	130.2kN
シャックル	78.4kN	156.8kN

c. 接続用の治具、ネット取付金物等

(a) 接続用の治具

接続用の治具の破断評価においては、計算により算出する応力で接続用の治具に破断が生じないように十分な余裕を持った強度を許容限界とする。具体的には、接続用の治具の許容限界は、「鋼構造設計規準」(2005改定)に基づいた短期での許容応力度を適用する。接続用の治具に適用する許容限界を第3.1.4-3表に示す。

第3.1.4-3表 接続用の治具に適用する許容限界

評価対象部位	材質	考慮すべき 損傷モード	短期荷重に対する 許容応力 (MPa)
隅角部固定ボルト	SCM435H (強度区分8.8)	せん断	1.5 f_s (注1)
取付プレート (支持架構設置)	SN490B		
取付プレート (鋼製枠設置)	SS400		
取付プレート (鋼製枠設置) 溶接部	SS400 (注2)		

(注1) f_s : 許容せん断応力「鋼構造設計規準」(2005改定)に基づき算出する。

(注2) 母材である取付プレートの材質

(b) ネット取付金物等

ネット取付金物等の破断評価においては、計算による算出する応力でネット取付金物等のうち取付ボルト及び押さえボルトに破断が生じないように十分な余裕を持った強度を許容限界とする。具体的には、取付ボルト及び押さえボルトの許容限界は、「鋼構造設計規準」(2005改定)に基づいた短期での許容応力度を適用する。取付ボルト及び押さえボルトに適用する許容限界を第3.1.4-4表に示す。

第3.1.4-4表 ネット取付金物等のうち取付ボルト及び押さえボルトに適用する許容限界

評価対象部位	材質	考慮すべき 損傷モード	短期荷重に対する 許容応力 (MPa)
取付ボルト	SCM435H (強度区分10.9)	引張	1.5 f_t (注1)
押さえボルト		圧縮	

(注1) f_t : 許容引張応力「鋼構造設計規準」(2005改定)に基づき算出する。

(3) たわみ評価

防護ネットは、自重、積雪荷重、飛来物の衝撃荷重及び設計竜巻の風圧力による荷重に対し、計算により算出するネット全体の最大たわみ量が防護ネットと竜巻防護対象施設の離隔距離未満であることを確認するため、防護ネットと竜巻防護対象施設の最小離隔距離を許容限界 L_{min} として設定する。

第3.1.4-6表にたわみ評価の許容限界を示す。

第3.1.4-6表 たわみ評価の許容限界

評価対象項目	許容限界
ネット全体の最大たわみ量	防護ネットと竜巻防護対象施設の 最小離隔距離 (L_{min})

3.1.5 評価方法

防護ネットの吸収エネルギー評価、破断評価及びたわみ評価の方法を以下に示す。
評価に際しては、飛来物の衝突位置の影響を考慮した評価を実施する。

飛来物の衝突位置の影響

評価においては、飛来物の衝突位置として中央位置に衝突することを想定した評価を実施しており、中央位置からずれたオフセット位置に衝突する場合の影響を考慮する。

吸収エネルギー評価においては、電中研報告書を参照して、ネット最大たわみ時のネットの全長は飛来物のネットへの衝突位置によらずネット最大たわみ時展開方向の長さで一定であり、ネットに発生する張力も一定となることから、飛来物のネットへの衝突位置によらずネットから飛来物への反力も同等となり、オフセット位置への飛来物の衝突時の吸収エネルギーは中央衝突時と同等となる。したがって、吸収エネルギー評価では中央衝突の場合にて評価を行う。

破断評価においては、中央位置への衝突に対してオフセット位置への衝突では、その移動距離が短くなることから、式⑧から中央位置衝突時よりもオフセット位置衝突時の方が作用する荷重が大きくなることを踏まえ、作用する荷重が大きくなるように、中央位置衝突時とオフセット位置衝突時の移動距離を踏まえた係数を作用する荷重に乗じる。ただし、ネット端部近傍に衝突する場合には、飛来物は傾き、飛来物の側面がネットや支持架構に接触すると考えられ、衝撃荷重は小さくなる。

たわみ評価においては、ネットの全長が飛来物の衝突位置によらず、ネット最大たわみ時展開方向の長さで一定となるため、たわみの軌跡が楕円状となることを考慮して評価する。さらに、ネットに対して飛来物がオフセット位置へ衝突した場合においても、各ワイヤロープに対して均等に張力が発生するため、算出結果は飛来物の衝突位置によらず適用可能である。また、ワイヤロープの初期張力は小さくワイヤロープの評価において有意ではないため計算上考慮しない。

(1) 吸収エネルギー評価

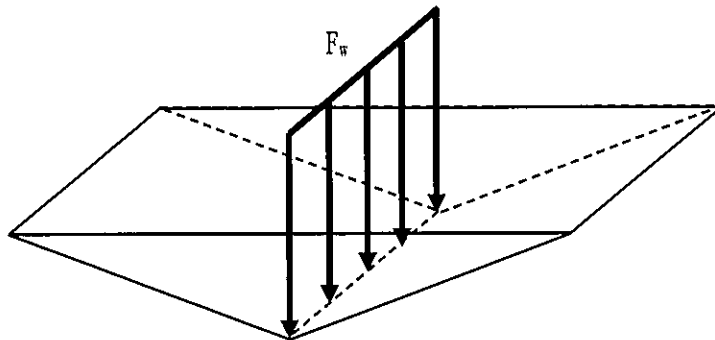
吸収エネルギー評価においては、電力中央研究所の評価式を参照して、ネットが異方性材料であることを考慮した吸収エネルギー量算定のモデル化を行い、自重、積雪荷重、風圧力による荷重及び飛来物による衝撃荷重によるエネルギーがネットの有する最大吸収エネルギーを下回ることを確認する。

式⑩より、 E_{max} は以下のとおりである。

$$E_{max} = \sum_{i=1}^{Ny} (2K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x (\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x))$$

自重、積雪荷重及び風圧力による荷重によりネットに作用する荷重は、ネット全体に等分布荷重として作用するものであるため、実現象に合わせネット展開直角方向に対しては荷重が等分布となるよう作用させる。一方、ネット展開方向に対しては、評価モデル上の制約により均一に荷重を作用させることが困難であるため、ネットに作用するエネルギーが保守的に大きくなるよう、 F_w が全てネット展開方向 L_x の中央に作用したとして、ネットにかかる作用力の式を用いて展開方向の1列当たりの自重、積雪荷重及び風圧力による荷重によりネットが受けるエネルギーを算出し、列数倍することでネット全体が自重、積雪荷重及び風圧力による荷重により受けるエネルギーを算出する。自重、積雪荷重及び風圧力の作用イメージを第3.1.5-1図に示す。

評価条件である K_x 及び L_x 並びに自重、積雪荷重及び風圧力による荷重から算出する F_w を式⑨に代入して数値計算を実施することにより、自重、積雪荷重及び風荷重による荷重によるたわみ量 δ_i が算出される。



第3.1.5-1図 自重、積雪荷重及び風荷重の作用イメージ

$$F_w = N_y \cdot 4K_x \cdot \delta_a \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_a^2 + L_x^2}} \right)$$

但し, $F_w = P_g + P_w + P_s$

上式にて算出した δ_a を式⑩において, 展開方向の1列当たりの自重, 積雪荷重及び風圧力による荷重によりネットが受けるエネルギーを列数倍する以下の式に代入することにより, 自重, 積雪荷重及び風圧力による荷重によりネットが受けるエネルギー E_w が算出される。

$$E_w = N_y \cdot (2K_x \cdot \delta_a^2 - K_x \cdot L_x (\sqrt{4\delta_a^2 + L_x^2} - L_x))$$

飛来物の衝突によりネットに作用するエネルギー E_i としては, 衝突時の飛来物の運動エネルギーとして, 以下より求められる。

$$E_i = \frac{1}{2} m v_i^2$$

飛来物の飛来速度は, ネット設置方向により水平設置の場合は鉛直の飛来速度, 鉛直設置の場合は水平の飛来速度にて算出する。斜め方向から衝突した場合の飛来速度の水平方向速度成分及び鉛直方向速度成分は, 評価に用いる水平最大飛来速度及び鉛直最大飛来速度を下回る。また, 飛来物がネットに対して斜め方向から衝突する場合は, 飛来物が衝突後に回転し, ネットと飛来物の衝突面積が大きくなるため, ネットに局部的に作用する荷重は小さくなる。したがって, 飛来物の衝突方向は, ネットに局部的に作用する荷重が大きくなるようにネットに対して垂直に入射するものとし, その飛来速度はネット設置方向に応じ, 水平設置の場合は鉛直最大飛来速度, 鉛直設置の場合は水平最大飛来速度を用いる。

以上から, n 枚のネット及び1枚の補助ネットを考慮したネットに作用する全エネルギー E_t が以下のとおり算出される。

$$E_t = E_i + E_w \quad \dots \quad \text{⑫}$$

(2) 破断評価

破断評価においては、電力中央研究所の評価式を参照して、ネットに作用する飛来物の衝撃荷重がネットの局所的な耐力未満であることを確認する。

評価に際しては、「2.3 評価条方針」とおり、飛来物の衝突位置の影響として、オフセット衝突する場合の影響を考慮する。以下に、オフセット衝突する場合の影響を係数として考慮した発生値の割増係数の設定方法を示す。

・オフセット衝突を考慮する係数

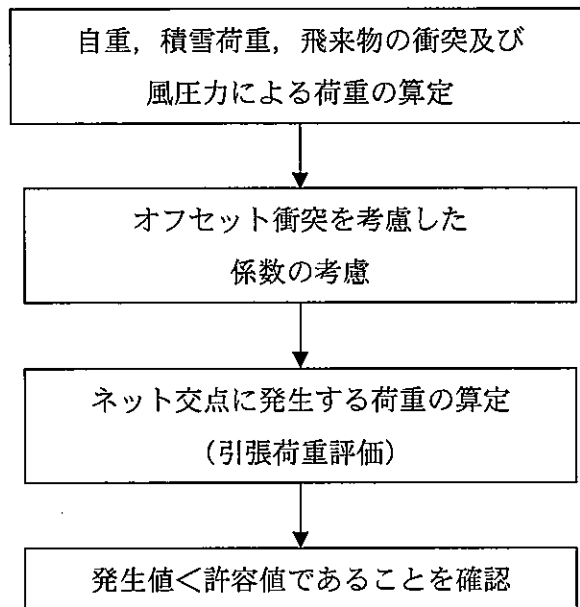
飛来物の移動距離が最も小さくなる場合のオフセット衝突を考えると、電中研報告書に基づき、中央衝突に比べ衝撃荷重が1.22倍となる。ネット端部近傍に衝突する場合には、飛来物は傾き、飛来物の側面がネットや支持架構に接触すると考えられ、衝撃荷重は小さくなる。

a. ネット

ネットに飛来物が衝突した後、ネットのたわみが増加し、飛来物の運動エネルギーを吸収する。ネットに発生する飛来物による衝撃荷重はネット変位の増加に伴い大きくなり、最大変位発生時に最大値を示すため、破断評価では最大変位発生時の衝撃荷重を用いる。

最大変位発生時において、飛来物の衝突によりネットの交点はネット展開方向に引張力を受けることから、破断評価としてネット交点の引張荷重評価を実施する。

ネットの破断評価の評価フローを第3.1.5-2図に示す。



第3.1.5-2図 ネットの破断評価フロー

ネットに飛来物が衝突した際に生じる衝撃荷重が、ネットの破断荷重以下であり、ネットに破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを確認する。

ここで、ネットに飛来物が衝突する場合の最大変位 δ は、「3.1.3 荷重及び荷重の組合せ」にて算出した式⑧のたわみ量と飛来物による衝撃荷重の関係式を用いて算出する。

飛来物の衝突による荷重に加え、自重、積雪荷重及び風荷重による荷重を考慮するため、 E_f を E_t と置き換えて、式⑧より、

$$F_a = \frac{8E_t}{3 \cdot \delta}$$

となる。

E_t としては、式②に基づいて飛来物による運動エネルギー E_f 並びに自重、積雪荷重及び風圧力による荷重によりネットが受けるエネルギー E_a から算出したネットに作用する全エネルギー量を代入する。 δ としては、たわみ評価で算出する飛来物が衝突する場合のネットの最大たわみ量を代入し、 F_a を算出する。

ここで、オフセット衝突による衝撃荷重の増加分を踏まえた係数1.22を考慮し、
衝撃荷重の最大値 F_a' は

$$F_a' = F_a \cdot 1.22$$

と算出される。

b. ワイヤロープ、ターンバックル及びシャックル

(a) ワイヤロープ

飛来物の衝撃荷重については、「3.1.3 荷重及び荷重の組合せ」において算出した飛来物が衝突する場合のネットごとに作用する衝撃荷重の最大値 F_a' を考慮する。

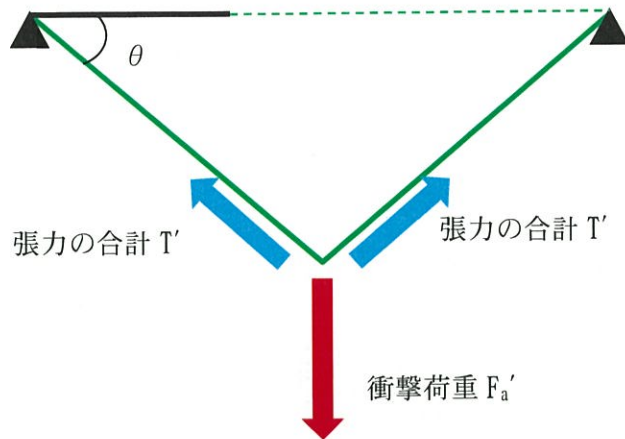
ネットは、電中研報告書と同様に2本のワイヤロープをL字に設置し、さらにワイヤロープが接続用の治具により拘束されない構造としており、電中研報告書において実施されている衝撃試験における実測値が包絡されることを確認している評価式を用いて評価を実施する。ネットに発生する荷重のつり合いのイメージ図を第3.1.5-3図に示す。

自重、積雪荷重、飛来物の衝撃荷重及び風圧力による荷重によりネットに作用する衝撃荷重の最大値 F_a' が集中荷重として作用するとしてモデル化すると、飛来物が衝突する場合のネット n 枚及び補助ネット1枚に発生する張力の合計の最大値 T' は、第3.1.5-3図の力のつり合いより以下のとおり算出される。

$$T' = \frac{F_a'}{2 \sin \theta}$$

θ は以下の式で求められる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2 \delta}{L_x}$$



第3.1.5-3図 ネットに発生する荷重のつり合い

各辺のワイヤロープは結合されていることから張力が一定となるため、ワイヤロープ1本が負担する張力は等分されると設定する。電中研報告書を参照すると、ネットn枚及び補助ネット1枚を重ねて設置する場合、補助ネットを設置したネットのワイヤロープに作用する張力は、その他のネットの張力の1.5倍となることを考慮すると、ネットn枚及び補助ネット1枚を重ねて設置する場合、1枚のネットのワイヤロープに発生する張力の最大値 T_1' は、

$$T_1' \cdot 2 + \frac{2 \cdot 2}{3} T_1' \cdot (n-1) = T'$$

$$T_1' = \frac{3}{4n+2} T' = \frac{3}{4(2n+1)} \cdot \frac{F_a'}{\sin \theta}$$

と算出される。

また、全ワイヤロープの合計張力 T_T は、

$$T_T = \frac{T'}{2}$$

と算出される。

(b) ターンバックル

ターンバックルの評価については、以下の評価を実施する。

ターンバックルに作用するワイヤロープに発生する張力の最大値が、ターンバックルの許容限界未満であることを確認する。

(c) シャックル

シャックルの評価については、以下の評価を実施する。

シャックルに作用するワイヤロープに発生する張力の最大値が、シャックルの許容限界未満であることを確認する。

c. 接続用の冶具，ネット取付金物等

(a) 接続用の冶具

ア. 隅角部固定ボルト

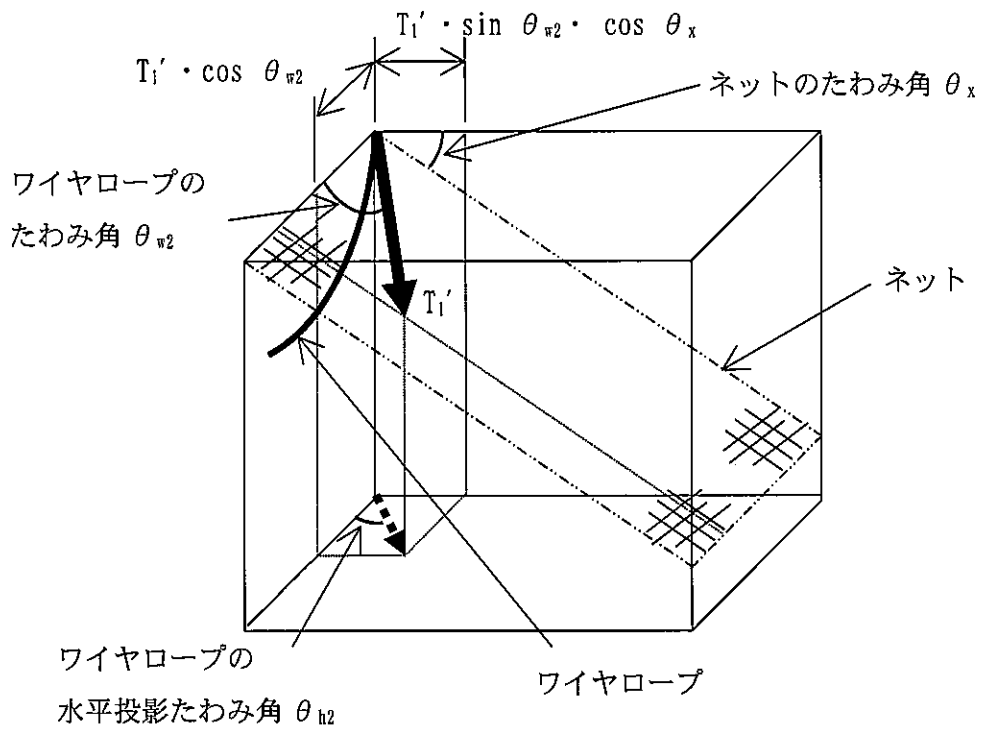
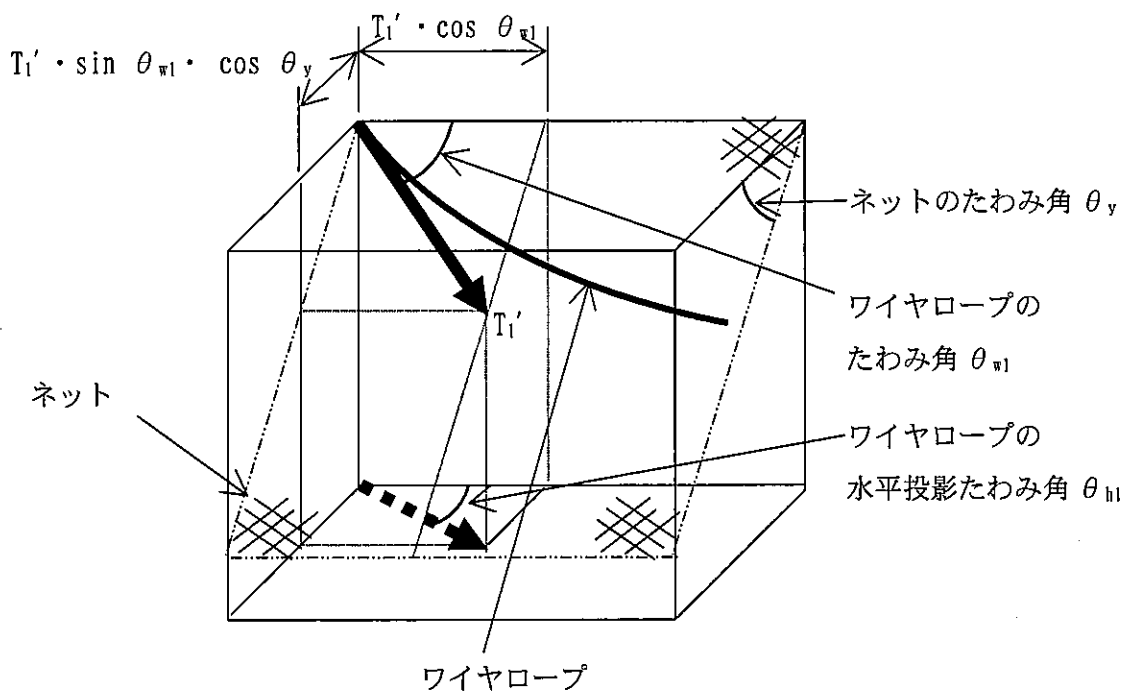
ワイヤロープは、設置するネット枚数に応じて設置するため、隅角部固定ボルトにかかる応力は、ネット枚数毎に評価する。

支持架構または鋼製枠の4隅に設置した隅角部固定ボルトは、ワイヤロープの荷重を保持管を介して受けることとなる。

ここで、ワイヤロープはたわみにより保持管に対して θ_{h1} 、 θ_{h2} の水平投影たわみ角を有することから、隅角部固定ボルトへ作用する荷重にはこのたわみ角を考慮する。

鉛直方向成分は、水平方向成分のように隅角部固定ボルトに対する有意な荷重ではないことから、面内荷重で評価する。

ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係を第3.1.5-4図に、隅角部固定ボルトの荷重状態を第3.1.5-5図に示す。



第3.1.5-4図 ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係

これより、展開方向のワイヤロープの水平投影たわみ角 θ_{h1} は、

$$\theta_{h1} = \tan^{-1} \left(\frac{T_1' \cdot \sin \theta_{w1} \cdot \cos \theta_y}{T_1' \cdot \cos \theta_{w1}} \right) = \tan^{-1} (\tan \theta_{w1} \cdot \cos \theta_y)$$

より求まる。

ただし、 θ_y 、 θ_{w1} は以下の式で求められる。

$$\theta_y = \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \delta}{L_y} \right)$$

$$\theta_{w1} = \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 + 16 \left(\frac{\delta_{wx}}{L_x} \right)^2}}$$

また、展開直角方向のワイヤロープの水平投影たわみ角 θ_{h2} は、

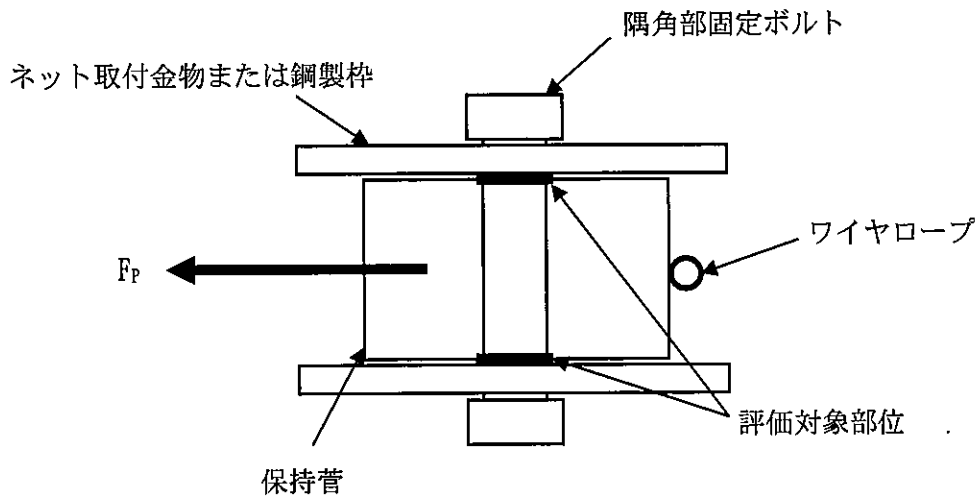
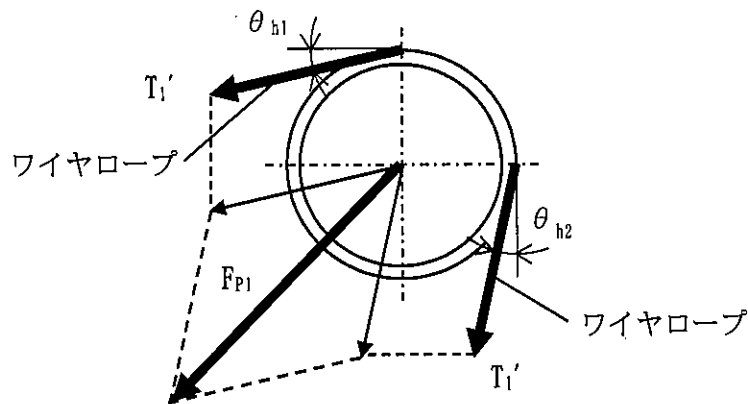
$$\theta_{h2} = \tan^{-1} \left(\frac{T_1' \cdot \sin \theta_{w2} \cdot \cos \theta_x}{T_1' \cdot \cos \theta_{w2}} \right) = \tan^{-1} (\tan \theta_{w2} \cdot \cos \theta_x)$$

より求まる。

ただし、 θ_x 、 θ_{w2} は以下の式で求められる。

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \delta}{L_x} \right)$$

$$\theta_{w2} = \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 + 16 \left(\frac{\delta_{wy}}{L_y} \right)^2}}$$



第3.1.5-5図 隅角部固定ボルトの荷重状態

第3.1.5-5図より、隅角部固定ボルトに作用するワイヤロープからの荷重のうち、補助ネットを設置する1枚目のネットにより作用する荷重 F_{P1} は、

$$F_{P1} = \sqrt{(T_1' + T_1' \cos(90 - \theta_{h1} - \theta_{h2}))^2 + (T_1' \sin(90 - \theta_{h1} - \theta_{h2}))^2}$$

となる。

また、補助ネットを設置したネットのワイヤロープに作用する張力は、その他のネットの張力の1.5倍となることを考慮すると、1枚目のネット以外のネットのワイヤロープにより隅角部固定ボルトへ作用する荷重 F_{P2} は、

$$F_{P2} = \frac{F_{P1}}{1.5}$$

となる。

したがって、ワイヤロープにより支持部へ作用する荷重 F_P は、

$$F_P = F_{P1} + F_{P2} \cdot (n-1)$$

となる。

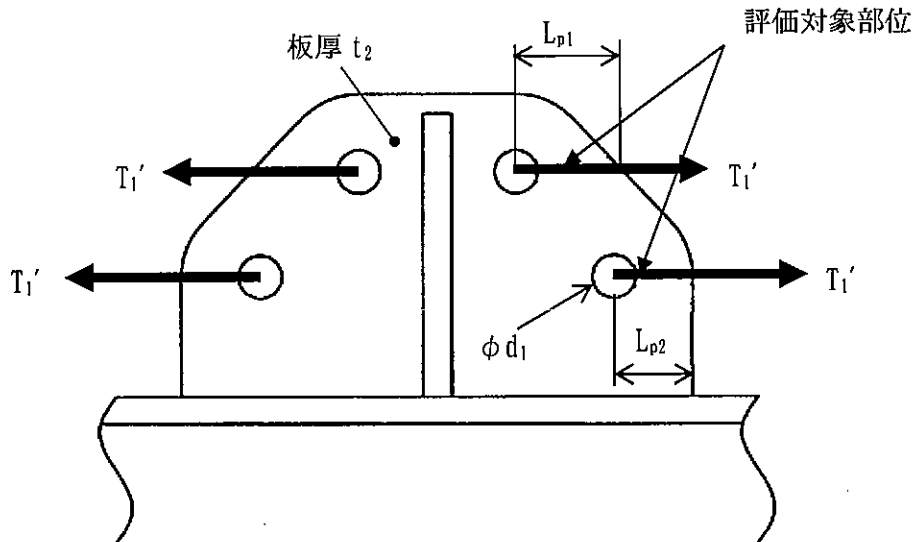
以上より、隅角部固定ボルトに発生するせん断応力 τ_s は、

$$\tau_s = \frac{F_P}{2 \cdot n_2 \cdot A_{b1}}$$

イ. 取付プレート

(ア) 支持架構設置

飛来物がネットに衝突する場合にネット取付部への衝撃荷重は、ワイヤロープの引張荷重 T_1' として作用し、取付プレートにせん断応力が発生するため、せん断応力評価を実施する。取付プレートを第3.1.5-6図に示す。



第3.1.5-6図 取付プレート（支持架構設置）

取付プレートの有効せん断面積 A_{s1} は、

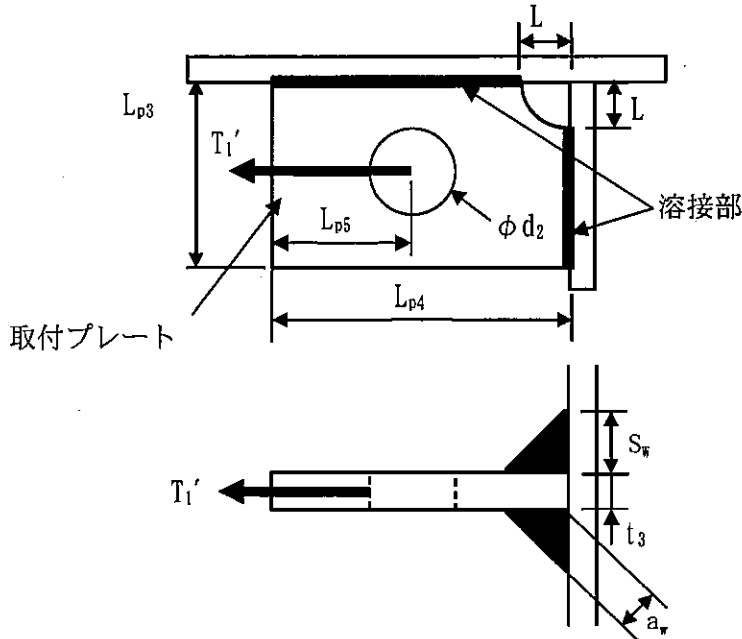
$$A_{s1} = 2 \cdot \left(\text{Min}(L_{p1}, L_{p2}) - \frac{\phi d_1}{2} \right) \cdot t_2$$

取付プレートに発生するせん断応力 τ_{p1} は、

$$\tau_{p1} = \frac{T_1'}{A_{s1}}$$

(イ) 鋼製枠設置

飛来物がネットに衝突する場合にネット取付部への衝撃荷重は、ワイヤロープの引張荷重 T_1' として作用し、取付プレート及び隅肉溶接部にせん断応力が発生するため、せん断応力評価を実施する。取付プレート及び溶接部を第3.1.5-7図に示す。



第3.1.5-7図 取付プレート（鋼製枠設置）

溶接部の有効長さ L_{pw} は、

$$L_{pw} = L_{p3} - L - 2 \cdot S_w + L_{p4} - L - 2 \cdot S_w$$

溶接部に発生するせん断応力 τ_w は、

$$\tau_w = \frac{T_1'}{2 \cdot a_w \cdot L_{pw}}$$

ここで、溶接部ののど厚 a_w は以下により求められる。

$$a_w = \frac{S_w}{\sqrt{2}}$$

取付プレートの有効せん断面積 A_{s2} は、

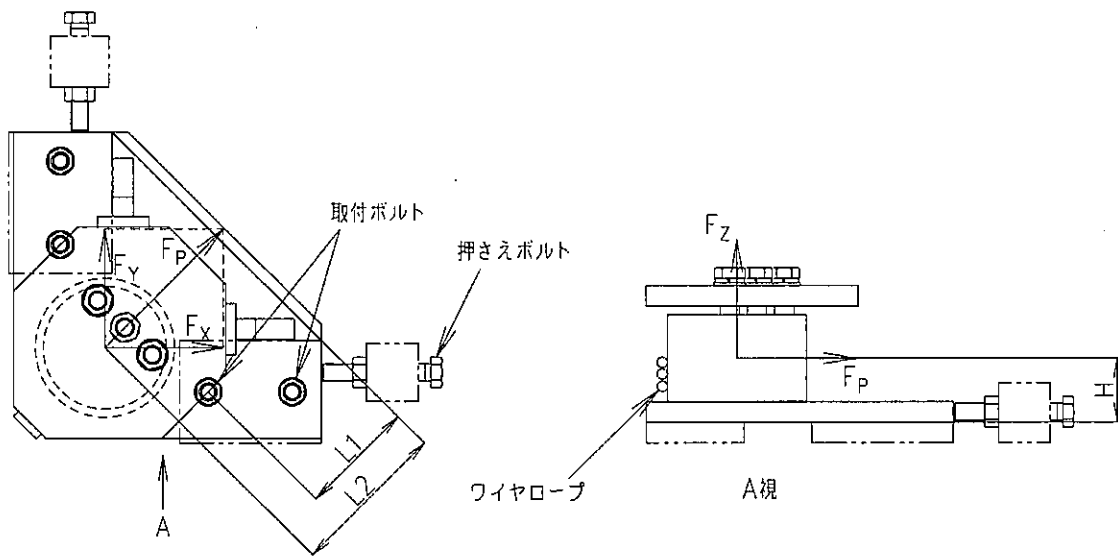
$$A_{s2} = 2 \cdot \left(L_{p5} - \frac{\phi d_2}{2} \right) \cdot t_3$$

取付プレートに発生するせん断応力 τ_{p2} は、

$$\tau_{p2} = \frac{T_1'}{A_{s2}}$$

(b) ネット取付金物等

飛来物がネットに衝突するとワイヤロープを介してネット取付金物等に荷重 F_x , F_y , F_z が作用し、取付ボルトに引張応力が発生するため、引張応力評価を実施する。また、押さえボルトには圧縮応力が発生するため、圧縮応力評価を実施する。ネット取付金物等を第3.1.5-8図に示す。



第3.1.5-8図 ネット取付金物等

取付ボルトへ作用する荷重 P_1 は、保持管中心部に生じるモーメントより、以下の式で求められる。

$$P_1 = \frac{F_P \cdot H + F_z \cdot L_2}{L_1}$$

ここで、

$$F_z = T_T \cdot \sin \theta_{w1} \cdot \sin \theta_y + T_T \cdot \sin \theta_{w2} \cdot \sin \theta_x$$

取付ボルトに生じる引張応力 σ_{b1} は、動的倍率を踏まえた係数1.52を考慮し、

$$\sigma_{b1} = \frac{P_1 \cdot 1.52}{n_3 \cdot A_{b2}}$$

また、押さえボルトに生じる圧縮応力 σ_{b2} は、動的倍率を踏まえた係数1.52を考慮し、

$$\sigma_{b2} = \frac{\text{Max}(F_x, F_y) \cdot 1.52}{A_{b3}}$$

ここで、

$$F_x = T_T \cdot \sin \theta_1 + T_T \cdot \cos \theta_2$$

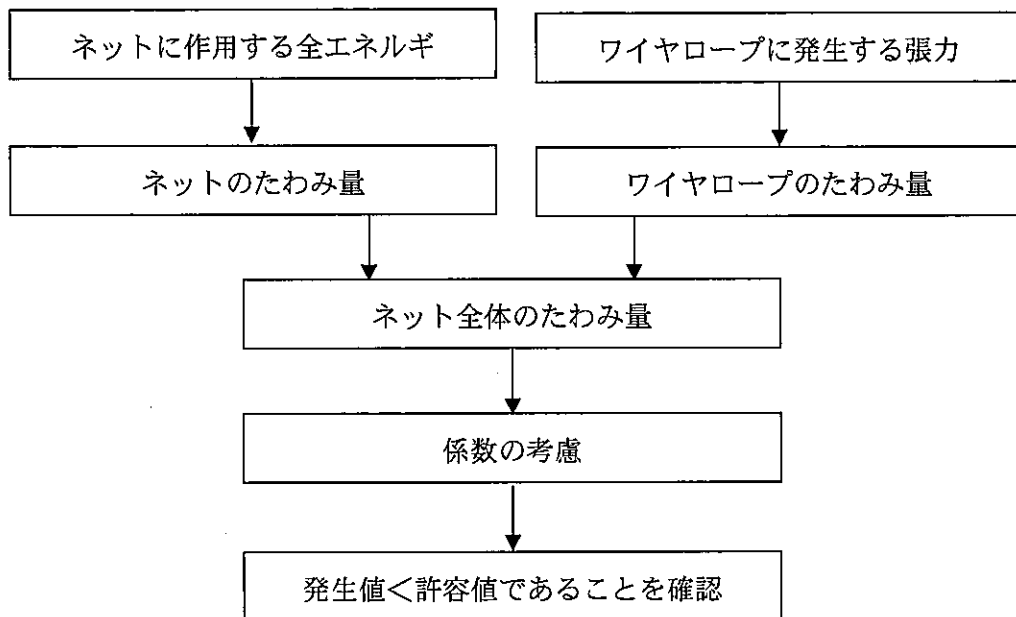
$$F_y = T_T \cdot \cos \theta_1 + T_T \cdot \sin \theta_2$$

(3) たわみ評価

たわみ評価においては、吸収エネルギー算定モデルを用い、飛来物の運動エネルギー、風圧力による荷重、積雪荷重及び自重によるエネルギーを吸収するために必要となるネットのたわみ量を導出する。また、合わせてワイヤロープ張力に応じたワイヤロープのたわみ量についても導出し、離隔距離未満であることを確認する。

たわみ評価においては、等価剛性の影響を考慮した「3.1.4 許容限界(1) 吸収エネルギー評価」と同様の係数を最大たわみ量が大きくなるように考慮する。

たわみ評価の評価フローを第3.1.5-10図に示す。



第3.1.5-9図 たわみ評価の評価フロー

a. ネット

ネットの変位量と吸収エネルギーとの関係は式⑩のとおり、以下の式にて導出される。

$$E_i = 2K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x (\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x)$$

ここで、 K_x 及び L_x は定数であるため、

$$\sum_{i=1}^{N_y} E_i = E_t$$

とすることで、ネットへの付加エネルギーに応じたたわみ量 δ を算出することができる。

b. ワイヤロープ、ターンバックル及びシャックル

(a) ワイヤロープたわみ量を含めたネット全体のたわみ量の算出

ワイヤロープのたわみ量は、ネット張力によりワイヤロープが放物線状に変形するとし、算出したワイヤロープに発生する張力及びワイヤロープの引張試験結果(荷重-ひずみ曲線)から変形後のワイヤロープ長さを求めることで導出する。ネットのたわみ量は中央衝突時に最大となるため、ワイヤロープたわみ量を導出する際のワイヤロープ張力は、式⑬にて算出される中央衝突時の値を用いる。

$$T_t = \frac{3}{4(2n+1)} \cdot \frac{F_a}{\sin \theta} \dots \textcircled{13}$$

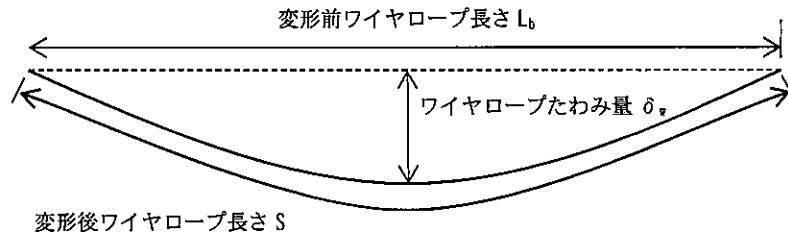
また、ワイヤロープの初期張力は小さくワイヤロープのたわみ量の算出において有意ではないため計算上考慮しない。

式⑬に示す計算方法を用いて算出されるワイヤロープに発生する張力からワイヤロープのひずみ量 ε が算出される。したがって、変形によるワイヤロープの伸び量 δ' は以下のとおり算出される。

$$\delta' = L_z \cdot \varepsilon$$

また、飛来物の衝突によりワイヤロープが第3.1.5-11図のとおり放物線状に変形すると、変形後のワイヤロープ長さ S は放物線の弦長の式を用いて以下のとおり表される。

$$S = \frac{1}{2} \sqrt{L_b^2 + 16 \delta_w^2} + \frac{L_b^2}{8 \delta_w} \ln \left(\frac{4 \delta_w + \sqrt{L_b^2 + 16 \delta_w^2}}{L_b} \right)$$



第3. 1. 5-11図 ワイヤロープ変形図

ワイヤロープたわみ量を含めたネット全体のたわみ量の算出を行う。ネット及びワイヤロープ変形図を第3. 1. 5-12図に示す。

ネット展開方向と平行に配置されているワイヤロープの変形後の長さを S_x 、ネット展開直角方向に配置されているワイヤロープの変形後の長さを S_y とすると、 S_x 及び S_y はそれぞれ δ_{wx} 、 δ_{wy} の関数であり、ワイヤロープ伸び量 δ' は、

$$\delta' = (S_x(\delta_{wx}) - L_x) + (S_y(\delta_{wy}) - L_y)$$

と表される。

また、ネット展開方向と平行な断面から見たたわみ量と、ネット展開方向と直交する断面から見たたわみ量は等しいことから、

$$\delta_i = \sqrt{\left(\delta_{wy} + \frac{L_x}{2\cos\theta_x}\right)^2 - \left(\frac{L_x}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\delta_{wx} + \frac{L_y}{2\cos\theta_y}\right)^2 - \left(\frac{L_y}{2}\right)^2}$$

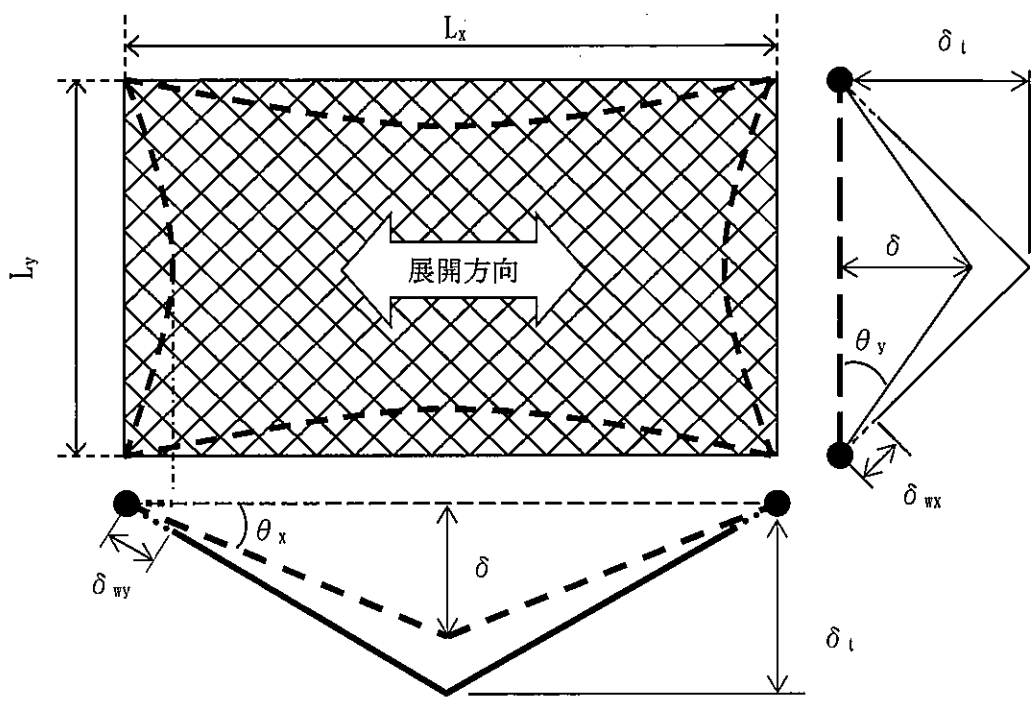
と表され、ワイヤロープたわみ量 δ_{wx} 及び δ_{wy} を導出することができ、同時にワイヤロープたわみ量を含めたネット全体のたわみ量 δ_i が算出される。

ここで、等価剛性の導出過程を踏まえた係数1.056を考慮し、ネット全体の最大たわみ量 δ_i' は、

$$\delta_i' = \delta_i \cdot 1.056$$

となる。

○ 新 R ① JN 安コ V 00368 A ○



第3.1.5-12図 ネット及びワイヤロープ変形図

3.2 評価条件

3.2.1 荷重条件

飛来物の衝撃荷重の算定条件を第3.2.1-1表に、風圧力による荷重の算定条件を第3.2.1-2表に、積雪荷重の算定条件を第3.2.1-3表に示す。

第3.2.1-1表 飛来物の衝撃荷重の算定条件

飛来物	b×c (mm)	m (kg)	V ₁ (m/s)	
			鉛直方向	水平方向
鋼製材	300×200	135	34	51

第3.2.1-2表 風圧力による荷重の算定条件

C	G	ρ	V _D
(-)	(-)	(kg/m ³)	(m/s)
1.4	1.0	1.22	100

第3.2.1-3表 積雪荷重の算定条件

単位面積当たりの積雪荷重 (N/m ² /cm)	積雪高さ (cm)
30	66.5

3.2.2 防護ネット仕様

(1) ネット

a. ネット仕様

ネット仕様として、電中研報告書等を参照し、引張試験に用いたネットの仕様を第3.2.2-1表に示す。

第3.2.2-1表 ネットの諸元

項目	記号	仕様		備考
		主ネット	補助ネット	
ネット材料	-	SWGF-4 (JIS G 3548)		-
ネット目合い寸法	-	50mm	40mm	電中研報告書による
ネット1目合いの対角寸法	a	$50 \times \sqrt{2} =$ 70.7mm	$50 \times \sqrt{2} =$ 56.6mm	
ネット1目合いの破断変位	a _s	17.6mm	13.9mm	
ネット素線の直径	-	4mm	4mm	
ネット1目合いの破断荷重	F _{bm}	15.1kN	17.2kN	
ネット1目合いの等価剛性	K	858kN/m	1,239kN/m	
衝突箇所周辺の ネットの1枚当たりの交点数	n ₁	16個	20個	
ネットの素線の引張強度	-	1,400N/mm ² 以上	1,400 N/mm ² 以上	
破断時たわみ角	θ _{max}	36.8deg	36.6deg	
ネットの単位面積あたりの質量	-	4.6kg/m ²	5.7kg/m ²	
ネットの充実率	φ	0.39 (3枚 ^(注2))		(計算値 ^(注1))

$$(注1) \phi = 1 - \left(\frac{(ネット目合い寸法 : 50mm)^2}{(ネット目合い寸法 : 50mm + ネット素線径 : 4mm)^2} \right)^2$$

$$\cdot \left(\frac{(ネット目合い寸法 : 40mm)^2}{(ネット目合い寸法 : 40mm + ネット素線径 : 4mm)^2} \right)$$

(注2) 補助ネットを含む。

b. ネット構成

ネットの構成を第3.2.2-2表及び第3.2.2-1図に示す。



第3.2.2-2表 ネットの構成 (1/3)

No.	ネットサイズ (m)			ネット枚数 n
	Lx	×	Ly	
AT01-14	5.673	×	4.623	2枚 (1枚)
AT15	5.673	×	3.033	
AT16-21	5.673	×	4.623	
AT22	5.673	×	4.233	
AT23-49	5.673	×	4.623	
AS01-03	5.673	×	4.380	
AS04	5.890	×	4.730	
AS05-06	5.673	×	4.473	
AS07-10	5.673	×	4.973	
AS11-17	5.673	×	4.013	
AS18-20	5.673	×	4.380	
AS21	4.880	×	4.473	
AS22-24	5.673	×	4.473	
AS25	4.880	×	4.473	
AS26-28	5.673	×	4.680	
AN01-04	5.673	×	4.230	
AN05-07	5.673	×	4.473	
AN08-11	5.673	×	4.973	
AN12-18	5.673	×	4.013	
AN19-21	5.673	×	4.380	
AN22	4.880	×	4.473	
AN23-24	5.673	×	4.473	
AN25	4.880	×	4.473	
AN26-28	5.673	×	4.680	
AE01-03	4.623	×	4.230	

() 内は補助ネット枚数

第3. 2. 2-2表 ネットの構成 (2/3)

No.	ネットサイズ (m)			ネット枚数 n
	Lx	×	Ly	
AE04-06	4. 623	×	4. 473	2枚 (1枚)
AE07-10	4. 973	×	4. 623	
AE11-17	4. 623	×	4. 013	
AE18	4. 380	×	4. 305	
AE19-20	4. 623	×	4. 380	
AE21	4. 380	×	4. 305	
AE22	4. 473	×	4. 305	
AE23-24	4. 623	×	4. 473	
AE25	4. 473	×	4. 305	
AE26-28	4. 680	×	4. 623	
AW01	4. 623	×	4. 180	
AW02	5. 723	×	4. 180	
AW03-06	4. 973	×	4. 623	
AW07-09	4. 623	×	4. 013	
AW10	5. 723	×	4. 013	
AW11	4. 013	×	3. 523	
AW12-13	4. 623	×	4. 013	
AW14	4. 380	×	4. 305	
AW15	4. 623	×	4. 380	
AW16	4. 380	×	3. 523	
AW17	4. 623	×	4. 380	
AW18	4. 380	×	4. 305	
AW19	4. 473	×	4. 305	
AW20	4. 623	×	4. 473	
AW21	4. 473	×	3. 523	
AW22	4. 623	×	4. 473	
AW23	4. 473	×	4. 305	
AW24	4. 680	×	3. 523	

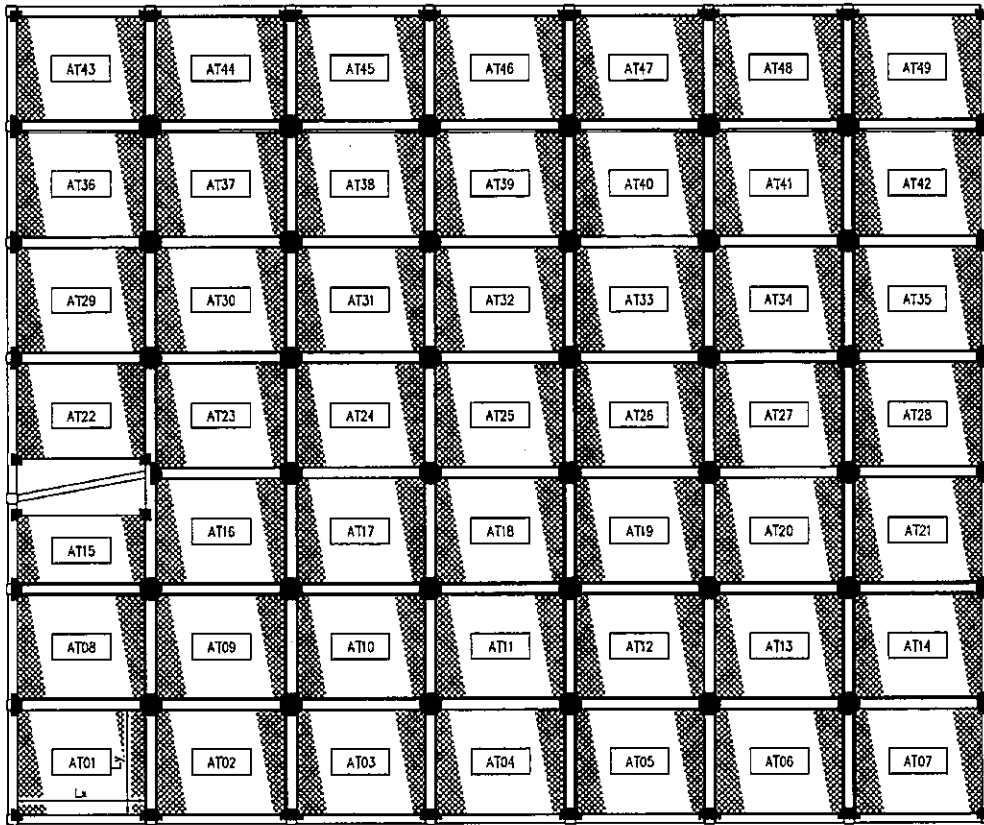
() 内は補助ネット枚数

新R ㊦ JN 安ユ V 00373 B

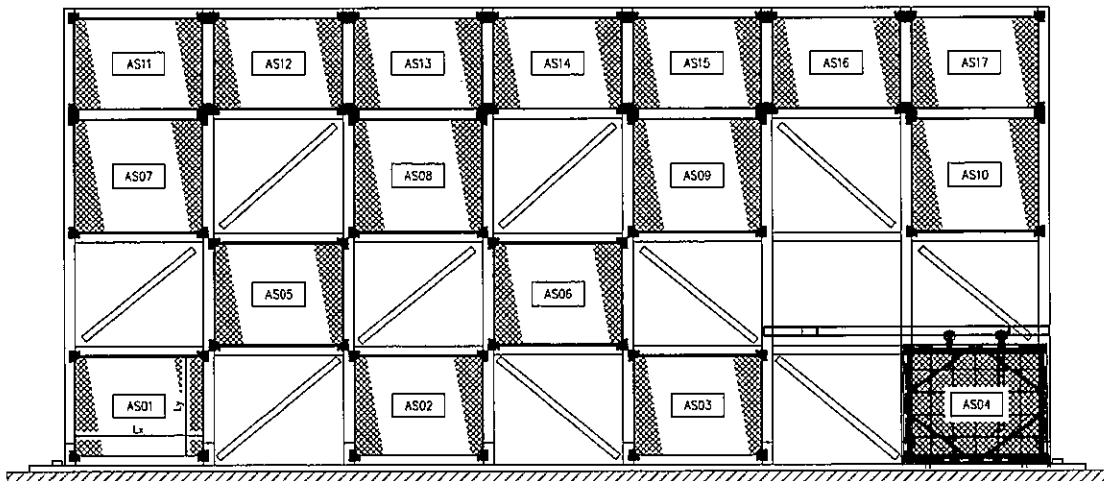
第3.2.2-2表 防護ネットの構成 (3/3)

No.	ネットサイズ (m)			ネット枚数 n
	Lx	×	Ly	
AW25	5.723	×	4.680	2枚 (1枚)
AW26	4.680	×	4.623	
AHW01	4.623	×	4.230	
AHW02	5.723	×	4.230	

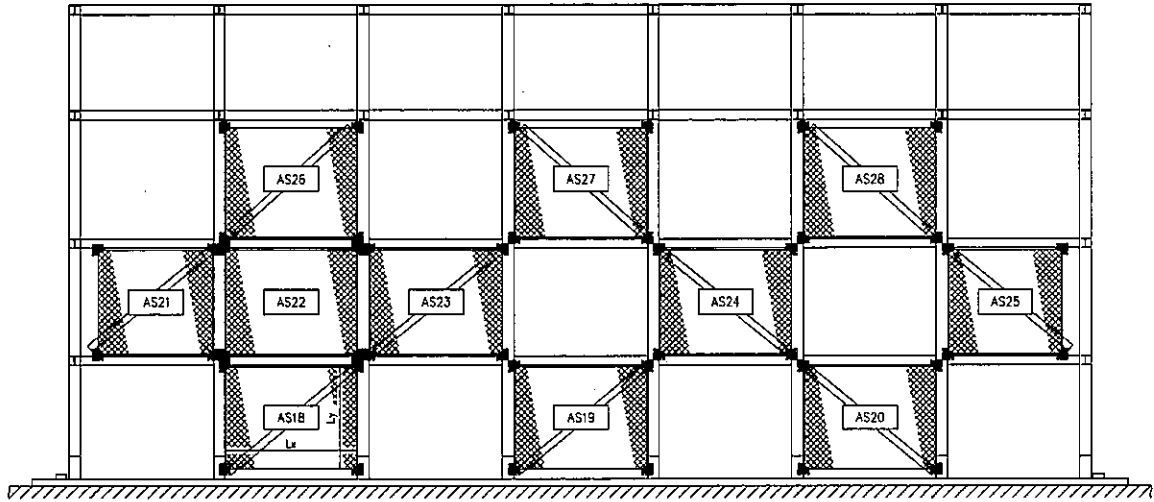
() 内は補助ネット枚数



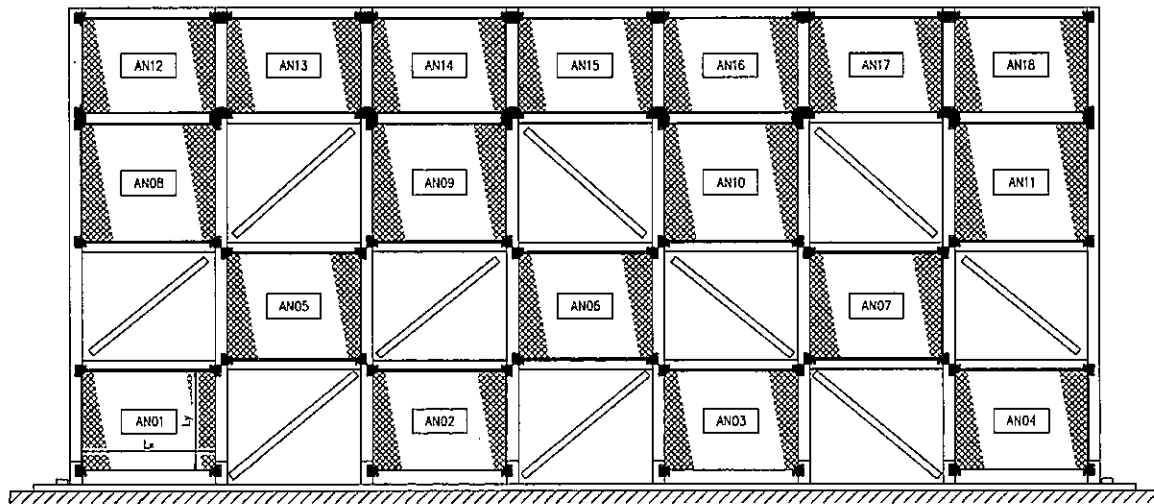
第3. 2. 2-1図 ネット割付展開図 (天面) (1/10)



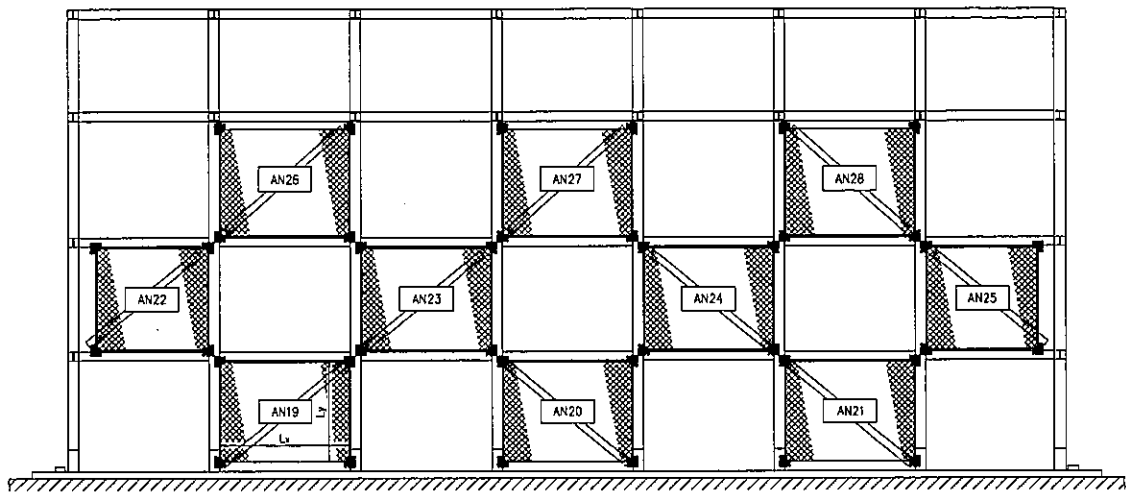
第3. 2. 2-1図 ネット割付展開図 (南側外面) (2/10)



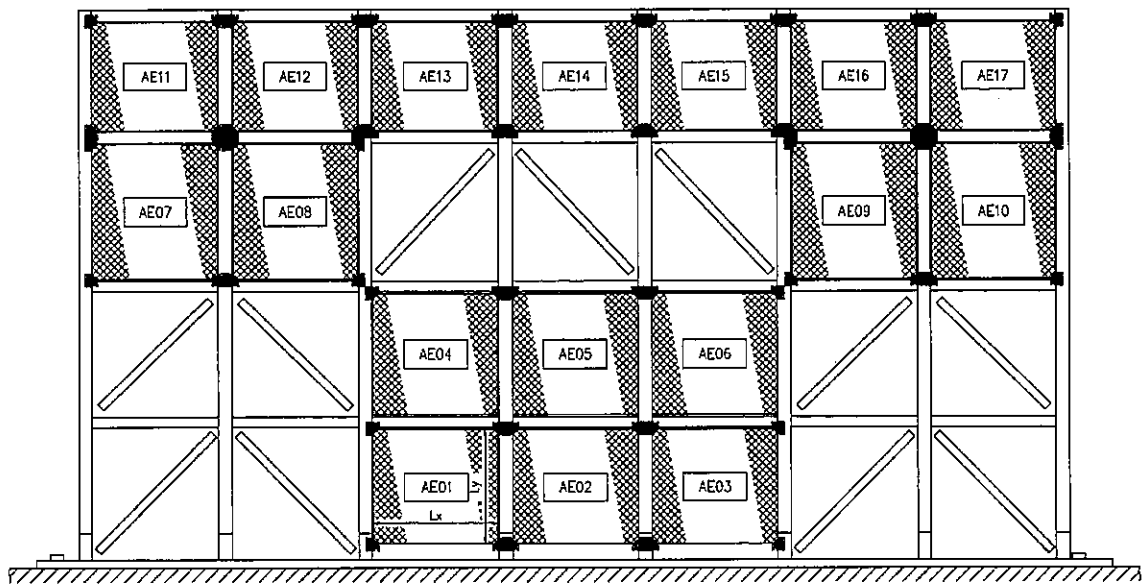
第3. 2. 2-1図 ネット割付展開図 (南側内面) (3/10)



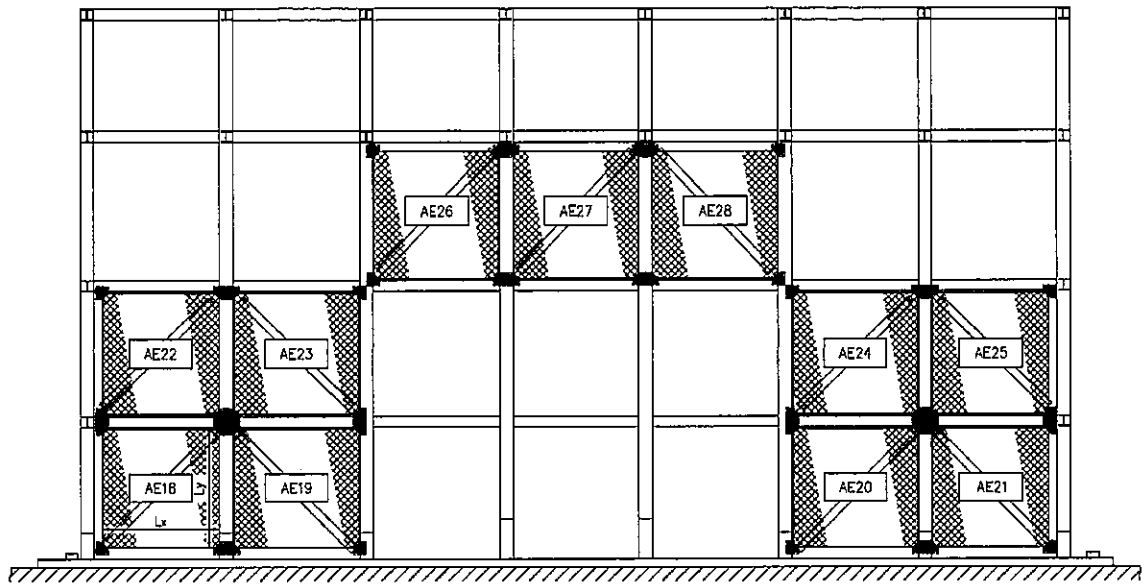
第3. 2. 2-1図 ネット割付展開図 (北側外面) (4/10)



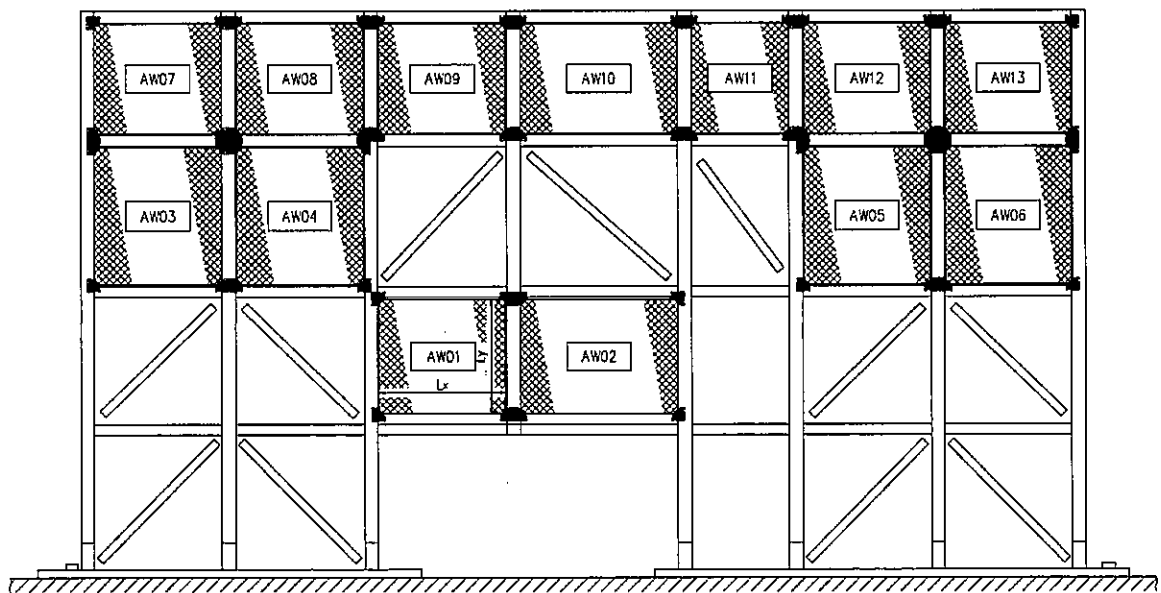
第3.2.2-1図 ネット割付展開図（北側内面）（5/10）



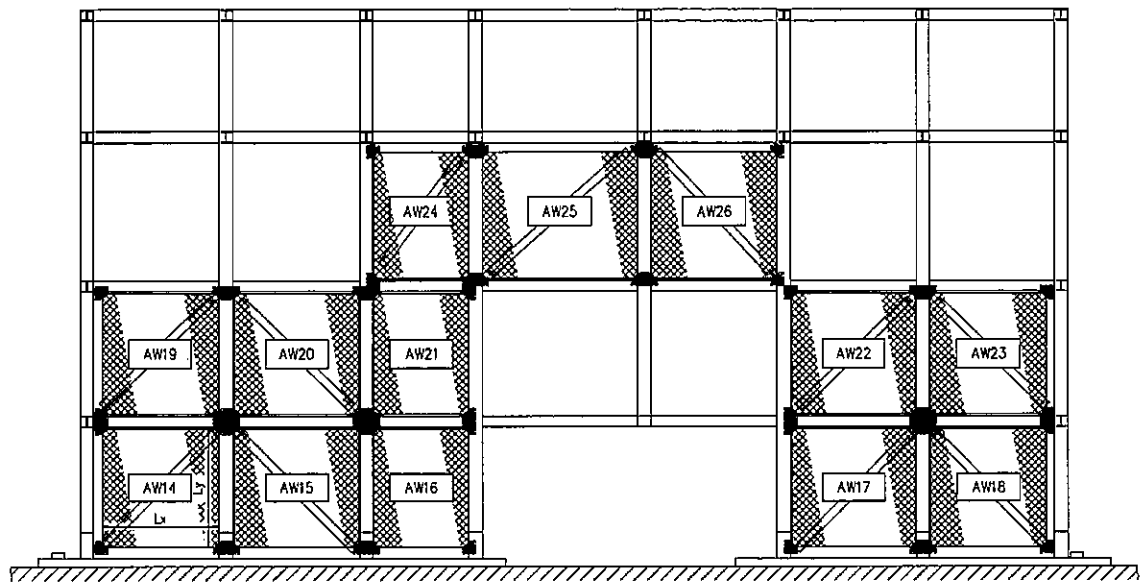
第3.2.2-1図 ネット割付展開図（東側外面）（6/10）



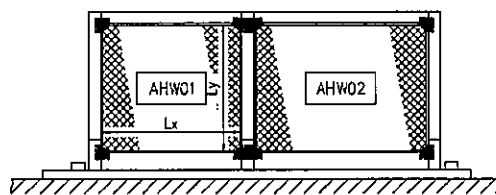
第3. 2. 2-1図 ネット割付展開図（東側内面）(7/10)



第3. 2. 2-1図 ネット割付展開図（西側外面）(8/10)



第3. 2. 2-1図 ネット割付展開図 (西側内面) (9/10)



第3. 2. 2-1図 ネット割付展開図 (西側張り出し部) (10/10)

- (2) ワイヤロープ, ターンバックル及びシャックル
 評価における条件を以下に示す。

a. ワイヤロープ

ワイヤロープの仕様を第3.2.2-3表に示す。

第3.2.2-3表 ワイヤロープの仕様

評価対象部位	仕様	径	破断荷重 F_{bw} (kN)	ワイヤグリップ効率 C_c
ワイヤロープ	7×7	φ16	165 (注1)	0.8 (注2)

(注1) JIS G 3549の破断強度

(注2) JIS B 2809及び(社)日本道路協会「小規模吊橋指針・同解説」

b. ターンバックル

ターンバックルの仕様を第3.2.2-4表に示す。

第3.2.2-4表 ターンバックルの仕様

評価対象部位	規格値 (kN)	許容限界 (kN)
ターンバックル	86.8	130.2

c. シャックル

シャックルの仕様を第3.2.2-5表に示す。

第3.2.2-5表 シャックルの仕様

評価対象部位	規格値 (kN)	許容限界 (kN)
シャックル	78.4	156.8

(3) 接続用の冶具

a. 接続用の冶具

評価における条件を以下に示す。

(a) 隅角部固定ボルト

隅角部固定ボルトの評価条件を第3.2.2-6表に示す。

第3.2.2-6表 隅角部固定ボルトの評価条件

評価対象部位	ボルト径	材質	ボルト本数 n_2
隅角部固定ボルト	M27	SCM435H (強度区分8.8)	3本

(b) 取付プレート

ア. 支持架構設置

取付プレート（支持架構設置）の評価条件を第3.2.2-7表に示す。

第3.2.2-7表 取付プレート（支持架構設置）の評価条件

評価対象部位	材質	取付け孔 位置寸法		取付け 孔径 ϕd_1 (mm)	板厚 t_2 (mm)
		L_{p1} (mm)	L_{p2} (mm)		
取付プレート	SN490B	69.6	55	33	32

イ. 鋼製枠設置

取付プレート（鋼製枠設置）の評価条件を第3. 2. 2-8表に示す。

第3. 2. 2-8表 取付プレート（鋼製枠設置）の評価条件

評価対象 項目	材質	プレート長さ		取付け 孔位置 寸法 L _{p5} (mm)	面取り 長さ L (mm)	取付け 孔径 φ d ₂ (mm)	板厚 t ₃ (mm)	溶接 脚長 S _w (mm)
		L _{p3} (mm)	L _{p4} (mm)					
取付 プレート	SS400	-	-	45	-	33	22	-
溶接部	(注1) SS400	100	130	-	25	-	-	9

(注1) 母材である取付プレートの材質

b. ネット取付金物等

ネット取付金物等の評価条件を第3. 2. 2-9表に示す。

第3. 2. 2-9表 ネット取付金物等の評価条件

評価 対象 項目	ボルト 径	材質	モーメント支点 からの距離		取付け面 から 保持管 中心まで の距離H (mm)	評価対象 の取付 ボルト 本数n ₃ (本)
			ボルト まで L ₁ (mm)	保持管 中心まで L ₂ (mm)		
取付 ボルト	M24	SCM435H	180.3	245.5	106.5	2
押さえ ボルト	M27	(強度区分10.9)	-	-	-	-

3.3 強度評価結果

3.3.1 吸収エネルギー評価

竜巻発生時の吸収エネルギー評価結果を第3.3.1-1表に示す。

すべてのネットにおいて、作用する全エネルギー(E_t)は、ネットの限界吸収エネルギー($E_{max'}$)を下回っている。

第3.3.1-1表 吸収エネルギー評価結果(1/3)

No.	E_t (kJ)	$E_{max'}$ (kJ)	検定比 ^(注1) (-)
AT01-14	104	390	0.27
AT15	95	249	0.38
AT16-21	104	390	0.27
AT22	102	358	0.28
AT23-49	104	390	0.27
AS01-03	190	369	0.51
AS04	193	391	0.49
AS05-06	190	380	0.50
AS07-10	192	397	0.48
AS11-17	189	323	0.59
AS18-20	190	369	0.51
AS21	186	325	0.57
AS22-24	190	380	0.50
AS25	186	325	0.57
AS26-28	191	376	0.51
AN01-04	190	358	0.53
AN05-07	190	380	0.50
AN08-11	192	397	0.48
AN12-18	189	323	0.59
AN19-21	190	369	0.51
AN22	186	325	0.57
AN23-24	190	380	0.50

(注1) 検定比 = $E_t/E_{max'}$ (小数第三位を四捨五入)

第3.3.1-1表 吸収エネルギー評価結果(2/3)

No.	E_i (kJ)	E_{max}' (kJ)	検定比 ^(注1) (-)
AN25	186	325	0.57
AN26-28	191	376	0.51
AE01-03	184	292	0.63
AE04-06	185	309	0.60
AE07-10	187	342	0.55
AE11-17	184	263	0.70
AE18	184	268	0.69
AE19-20	185	301	0.61
AE21	184	268	0.69
AE22	184	271	0.68
AE23-24	185	309	0.60
AE25	184	271	0.68
AE26-28	185	321	0.58
AW01	184	292	0.63
AW02	190	365	0.52
AW03-06	187	342	0.55
AW07-09	184	263	0.70
AW10	189	329	0.57
AW11	181	217	0.83
AW12-13	184	263	0.70
AW14	184	268	0.69
AW15	185	301	0.61
AW16	182	238	0.76
AW17	185	301	0.61
AW18	184	268	0.69
AW19	184	271	0.68
AW20	185	309	0.60

(注1) 検定比 = E_i/E_{max}' (小数第三位を四捨五入)

第3.3.1-1表 吸収エネルギー評価結果 (3/3)

No.	E_t (kJ)	E_{max}' (kJ)	検定比 ^(注1) (-)
AW21	183	240	0.76
AW22	185	309	0.60
AW23	184	271	0.68
AW24	183	251	0.73
AW25	191	383	0.50
AW26	185	321	0.58
AHW01	184	292	0.63
AHW02	190	365	0.52

(注1) 検定比 = E_t/E_{max}' (小数第三位を四捨五入)

3.3.2 破断評価

a. ネット

竜巻発生時の局部貫通（衝撃荷重）評価結果を第3.3.2-1表に示す。

すべてのネットにおいて、飛来物の衝撃荷重 (F_a') は、ネットの許容荷重 (F_n) を下回っている。

第3.3.2-1表 局部貫通（衝撃荷重）評価結果(1/3)

No.	F_a' (kN)	F_n (kN)	検定比 ^(注1) (-)
AT01-14	230.3	827	0.28
AT15	191.2	827	0.23
AT16-21	230.3	827	0.28
AT22	222.0	827	0.27
AT23-49	230.3	827	0.28
AS01-03	353.7	827	0.43
AS04	349.8	827	0.42
AS05-06	356.2	827	0.43
AS07-10	363.2	827	0.44
AS11-17	339.9	827	0.41
AS18-20	353.7	827	0.43
AS21	391.2	827	0.47
AS22-24	356.2	827	0.43
AS25	391.2	827	0.47
AS26-28	356.8	827	0.43
AN01-04	351.0	827	0.42
AN05-07	356.2	827	0.43
AN08-11	363.2	827	0.44
AN12-18	339.9	827	0.41
AN19-21	353.7	827	0.43
AN22	391.2	827	0.47
AN23-24	356.2	827	0.43

(注1) 検定比 = F_a' / F_n (小数第三位を四捨五入)

第3.3.2-1表 局部貫通（衝撃荷重）評価結果(2/3)

No.	F_a' (kN)	F_n (kN)	検定比 ^(注1) (-)
AN25	391.2	827	0.47
AN26-28	356.8	827	0.43
AE01-03	398.0	827	0.48
AE04-06	406.2	827	0.49
AE07-10	390.8	827	0.47
AE11-17	387.3	827	0.47
AE18	410.9	827	0.50
AE19-20	403.1	827	0.49
AE21	410.9	827	0.50
AE22	403.4	827	0.49
AE23-24	406.2	827	0.49
AE25	403.4	827	0.49
AE26-28	404.8	827	0.49
AW01	398.0	827	0.48
AW02	349.7	827	0.42
AW03-06	390.8	827	0.47
AW07-09	387.3	827	0.47
AW10	338.5	827	0.41
AW11	418.9	827	0.51
AW12-13	387.3	827	0.47
AW14	410.9	827	0.50
AW15	403.1	827	0.49
AW16	394.8	827	0.48
AW17	403.1	827	0.49
AW18	410.9	827	0.50
AW19	403.4	827	0.49
AW20	406.2	827	0.49

(注1) 検定比 = F_a' / F_n (小数第三位を四捨五入)

第3.3.2-1表 局部貫通（衝撃荷重）評価結果(3/3)

No.	F_a' (kN)	F_n (kN)	検定比 ^(注1) (-)
AW21	389.5	827	0.47
AW22	406.2	827	0.49
AW23	403.4	827	0.49
AW24	376.4	827	0.46
AW25	355.1	827	0.43
AW26	404.8	827	0.49
AHW01	398.0	827	0.48
AHW02	349.7	827	0.42

(注1) 検定比 = F_a' / F_n (小数第三位を四捨五入)

b. ワイヤロープ、ターンバックル及びシャックル

(a) ワイヤロープ

竜巻発生時の評価結果を第3.3.2-2表に示す。

ワイヤロープが負担する荷重 (T_1') は、ワイヤロープの許容荷重 (P) を下回っている。

第3.3.2-2表 ワイヤロープ評価結果 (1/3)

No.	T_1' (kN)	P (kN)	検定比 ^(注1) (-)
AT01-14	75.1	132	0.57
AT15	57.9	132	0.44
AT16-21	75.1	132	0.57
AT22	71.4	132	0.54
AT23-49	75.1	132	0.57
AS01-03	101.2	132	0.77
AS04	100.9	132	0.76
AS05-06	102.4	132	0.78
AS07-10	105.1	132	0.80
AS11-17	94.9	132	0.72
AS18-20	101.2	132	0.77
AS21	109.6	132	0.83
AS22-24	102.4	132	0.78
AS25	109.6	132	0.83
AS26-28	102.3	132	0.78
AN01-04	99.9	132	0.76
AN05-07	102.4	132	0.78
AN08-11	105.1	132	0.80
AN12-18	94.9	132	0.72
AN19-21	101.2	132	0.77
AN22	109.6	132	0.83
AN23-24	102.4	132	0.78

(注1) 検定比 = T_1'/P (小数第三位を四捨五入)

第3.3.2-2表 ワイヤロープ評価結果 (2/3)

No.	T _i ' (kN)	P (kN)	検定比 ^(注1) (-)
AN25	109.6	132	0.83
AN26-28	102.3	132	0.78
AE01-03	109.5	132	0.83
AE04-06	112.9	132	0.86
AE07-10	110.5	132	0.84
AE11-17	104.5	132	0.79
AE18	111.3	132	0.84
AE19-20	111.5	132	0.84
AE21	111.3	132	0.84
AE22	109.5	132	0.83
AE23-24	112.9	132	0.86
AE25	109.5	132	0.83
AE26-28	113.3	132	0.86
AW01	109.5	132	0.83
AW02	99.8	132	0.76
AW03-06	110.5	132	0.84
AW07-09	104.5	132	0.79
AW10	94.8	132	0.72
AW11	109.5	132	0.83
AW12-13	104.5	132	0.79
AW14	111.3	132	0.84
AW15	111.5	132	0.84
AW16	104.8	132	0.79
AW17	111.5	132	0.84
AW18	111.3	132	0.84
AW19	109.5	132	0.83
AW20	112.9	132	0.86

(注1) 検定比 = T_i'/P (小数第三位を四捨五入)

第3.3.2-2表 ワイヤロープ評価結果 (3/3)

No.	T ₁ ' (kN)	P (kN)	検定比 ^(注1) (-)
AW21	103.5	132	0.78
AW22	112.9	132	0.86
AW23	109.5	132	0.83
AW24	100.9	132	0.76
AW25	102.1	132	0.77
AW26	113.3	132	0.86
AHW01	109.5	132	0.83
AHW02	99.8	132	0.76

(注1) 検定比 = T₁' / P (小数第三位を四捨五入)

(b) ターンバックル

竜巻発生時の評価結果を第3.3.2-3表に示す。

発生荷重は、ターンバックルの許容限界を下回っている。

第3.3.2-3表 ターンバックルの評価結果

評価対象部位	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)	検定比 ^(注2) (-)
ターンバックル	113.3 ^(注1)	130.2	0.87

(注1) ワイヤロープ張力が最大である T_1' の値を示す。

(注2) 検定比 = 発生荷重/許容限界 (小数第三位を四捨五入)

(c) シャックル

竜巻発生時の評価結果を第3.3.2-4表に示す。

発生荷重は、シャックルの許容限界を下回っている。

第3.3.2-4表 シャックルの評価結果

評価対象部位	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)	検定比 ^(注2) (-)
シャックル	113.3 ^(注1)	156.8	0.72

(注1) ワイヤロープ張力が最大である T_1' の値を示す。

(注2) 検定比 = 発生荷重/許容限界 (小数第三位を四捨五入)

c. 接続用の冶具，ネット取付金物等

(a) 接続用の冶具

ア. 隅角部固定ボルト

接続用の冶具のうち，隅角部固定ボルトの竜巻発生時の評価結果を第3.3.2-5表に示す。ワイヤロープが負担する荷重(T_1')による発生応力は，隅角部固定ボルトの許容限界を下回っている。

第3.3.2-5表 接続用の冶具（隅角部固定ボルト）の評価結果(1/3)

No.	T_1' (kN)	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)	応力度比 ^(注1) (-)
AT01-14	75.1	72	334	0.22
AT15	57.9	55	334	0.16
AT16-21	75.1	72	334	0.22
AT22	71.4	69	334	0.21
AT23-49	75.1	72	334	0.22
AS01-03	101.2	99	334	0.30
AS04	100.9	98	334	0.29
AS05-06	102.4	100	334	0.30
AS07-10	105.1	103	334	0.31
AS11-17	94.9	92	334	0.28
AS18-20	101.2	99	334	0.30
AS21	109.6	107	334	0.32
AS22-24	102.4	100	334	0.30
AS25	109.6	107	334	0.32
AS26-28	102.3	100	334	0.30
AN01-04	99.9	97	334	0.29
AN05-07	102.4	100	334	0.30
AN08-11	105.1	103	334	0.31
AN12-18	94.9	92	334	0.28
AN19-21	101.2	99	334	0.30
AN22	109.6	107	334	0.32

(注1) 応力度比 = 発生応力/許容限界 (小数第三位を四捨五入)

第3.3.2-5表 接続用の冶具（隅角部固定ボルト）の評価結果(2/3)

No.	T _i ' (kN)	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)	応力度比 ^(注1) (-)
AN23-24	102.4	100	334	0.30
AN25	109.6	107	334	0.32
AN26-28	102.3	100	334	0.30
AE01-03	109.5	107	334	0.32
AE04-06	112.9	111	334	0.33
AE07-10	110.5	108	334	0.32
AE11-17	104.5	102	334	0.31
AE18	111.3	109	334	0.33
AE19-20	111.5	109	334	0.33
AE21	111.3	109	334	0.33
AE22	109.5	107	334	0.32
AE23-24	112.9	111	334	0.33
AE25	109.5	107	334	0.32
AE26-28	113.3	111	334	0.33
AW01	109.5	107	334	0.32
AW02	99.8	97	334	0.29
AW03-06	110.5	108	334	0.32
AW07-09	104.5	102	334	0.31
AW10	94.8	92	334	0.28
AW11	109.5	107	334	0.32
AW12-13	104.5	102	334	0.31
AW14	111.3	109	334	0.33
AW15	111.5	109	334	0.33
AW16	104.8	102	334	0.31
AW17	111.5	109	334	0.33
AW18	111.3	109	334	0.33
AW19	109.5	107	334	0.32

(注1) 応力度比 = 発生応力/許容限界 (小数第三位を四捨五入)

第3.3.2-5表 接続用の冶具（隅角部固定ボルト）の評価結果(3/3)

No.	T ₁ ' (kN)	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)	応力度比 ^(注1) (-)
AW20	112.9	111	334	0.33
AW21	103.5	100	334	0.30
AW22	112.9	111	334	0.33
AW23	109.5	107	334	0.32
AW24	100.9	98	334	0.29
AW25	102.1	99	334	0.30
AW26	113.3	111	334	0.33
AHW01	109.5	107	334	0.32
AHW02	99.8	97	334	0.29

(注1) 応力度比 = 発生応力/許容限界 (小数第三位を四捨五入)

イ. 取付プレート

(ア) 支持架構設置

接続用の冶具のうち、取付プレート（支持架構設置）の竜巻発生時の評価結果を第3.3.2-6表に示す。

ワイヤロープが負担する荷重 (T_i') による発生応力は、取付プレート（支持架構設置）の許容限界を下回っている。

第3.3.2-6表 接続用の冶具（取付プレート（支持架構設置））の評価結果 (1/3)

No.	T_i' (kN)	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)	応力度比 ^(注1) (-)
AT01-14	75.1	31	187	0.17
AT15	57.9	24	187	0.13
AT16-21	75.1	31	187	0.17
AT22	71.4	29	187	0.16
AT23-49	75.1	31	187	0.17
AS01-03	101.2	42	187	0.22
AS05-06	102.4	42	187	0.22
AS07-10	105.1	43	187	0.23
AS11-17	94.9	39	187	0.21
AS18-20	101.2	42	187	0.22
AS21	109.6	45	187	0.24
AS22-24	102.4	42	187	0.22
AS25	109.6	45	187	0.24
AS26-28	102.3	42	187	0.22
AN01-04	99.9	41	187	0.22
AN05-07	102.4	42	187	0.22
AN08-11	105.1	43	187	0.23
AN12-18	94.9	39	187	0.21
AN19-21	101.2	42	187	0.22
AN22	109.6	45	187	0.24
AN23-24	102.4	42	187	0.22

(注1) 応力度比 = 発生応力/許容限界 (小数第三位を四捨五入)

第3.3.2-6表 接続用の冶具（取付プレート（支持架構設置））の評価結果(2/3)

No.	T _i ' (kN)	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)	応力度比 ^(注1) (-)
AN25	109.6	45	187	0.24
AN26-28	102.3	42	187	0.22
AE01-03	109.5	45	187	0.24
AE04-06	112.9	46	187	0.25
AE07-10	110.5	45	187	0.24
AE11-17	104.5	43	187	0.23
AE18	111.3	46	187	0.25
AE19-20	111.5	46	187	0.25
AE21	111.3	46	187	0.25
AE22	109.5	45	187	0.24
AE23-24	112.9	46	187	0.25
AE25	109.5	45	187	0.24
AE26-28	113.3	46	187	0.25
AW01	109.5	45	187	0.24
AW02	99.8	41	187	0.22
AW03-06	110.5	45	187	0.24
AW07-09	104.5	43	187	0.23
AW10	94.8	39	187	0.21
AW11	109.5	45	187	0.24
AW12-13	104.5	43	187	0.23
AW14	111.3	46	187	0.25
AW15	111.5	46	187	0.25
AW16	104.8	43	187	0.23
AW17	111.5	46	187	0.25
AW18	111.3	46	187	0.25
AW19	109.5	45	187	0.24
AW20	112.9	46	187	0.25

(注1) 応力度比 = 発生応力/許容限界 (小数第三位を四捨五入)

第3.3.2-6表 接続用の冶具（取付プレート（支持架構設置））の評価結果(3/3)

No.	T_1' (kN)	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)	応力度比 ^(注1) (-)
AW21	103.5	43	187	0.23
AW22	112.9	46	187	0.25
AW23	109.5	45	187	0.24
AW24	100.9	41	187	0.22
AW25	102.1	42	187	0.22
AW26	113.3	46	187	0.25
AHW01	109.5	45	187	0.24
AHW02	99.8	41	187	0.22

(注1) 応力度比 = 発生応力/許容限界 (小数第三位を四捨五入)

(イ) 鋼製杵設置

接続用の冶具のうち、取付プレート（鋼製杵設置）の竜巻発生時の評価結果を第3.3.2-7表に示す。

ワイヤロープが負担する荷重 (T_1') による発生応力は、取付プレート（鋼製杵設置）の許容限界を下回っている。

第3.3.2-7表 接続用の冶具（取付プレート（鋼製杵設置））の評価結果

No.	T_1' (kN)	発生応力 (MPa)		許容限界 (MPa)		応力度比 ^(注1) (-)	
		溶接部	プレート	溶接部	プレート	溶接部	プレート
AS04	100.9	56	81	135	135	0.41	0.60

(注1) 応力度比 = 発生応力/許容限界（小数第三位を四捨五入）

(b) ネット取付金物等

ネット取付金物等のうち取付ボルト及び押さえボルトの竜巻発生時の評価結果を第3.3.2-8表に示す。

発生応力は、取付ボルト及び押さえボルトの許容限界を下回っている。

第3.3.2-8表 ネット取付金物等のうち取付ボルト及び押さえボルトの評価結果 (1/3)

No.	発生応力 (MPa)		許容限界 (MPa)		応力度比 ^(注1) (-)	
	取付ボルト	押さえボルト	取付ボルト	押さえボルト	取付ボルト	押さえボルト
AT01-14	198	468	727	727	0.27	0.64
AT15	146	361	727	727	0.20	0.50
AT16-21	198	468	727	727	0.27	0.64
AT22	187	445	727	727	0.26	0.61
AT23-49	198	468	727	727	0.27	0.64
AS01-03	247	640	727	727	0.34	0.88
AS05-06	250	648	727	727	0.34	0.89
AS07-10	261	663	727	727	0.36	0.91
AS11-17	227	599	727	727	0.31	0.82
AS18-20	440	640	727	727	0.61	0.88
AS21	479	691	727	727	0.66	0.95
AS22-24	445	648	727	727	0.61	0.89
AS25	479	691	727	727	0.66	0.95
AS26-28	444	645	727	727	0.61	0.89
AN01-04	242	632	727	727	0.33	0.87
AN05-07	250	648	727	727	0.34	0.89
AN08-11	261	663	727	727	0.36	0.91
AN12-18	227	599	727	727	0.31	0.82
AN19-21	440	640	727	727	0.61	0.88
AN22	479	691	727	727	0.66	0.95
AN23-24	445	648	727	727	0.61	0.89
AN25	479	691	727	727	0.66	0.95
AN26-28	444	645	727	727	0.61	0.89

(注1) 応力度比 = 発生応力/許容限界 (小数第三位を四捨五入)

第3.3.2-8表 ネット取付金物等のうち取付ボルト及び押さえボルトの評価結果(2/3)

No.	発生応力 (MPa)		許容限界 (MPa)		応力度比 ^(注1) (-)	
	取付 ボルト	押さえ ボルト	取付 ボルト	押さえ ボルト	取付 ボルト	押さえ ボルト
AE01-03	266	691	727	727	0.37	0.95
AE04-06	277	712	727	727	0.38	0.98
AE07-10	273	697	727	727	0.38	0.96
AE11-17	252	657	727	727	0.35	0.90
AE18	489	700	727	727	0.67	0.96
AE19-20	489	702	727	727	0.67	0.97
AE21	489	700	727	727	0.67	0.96
AE22	479	688	727	727	0.66	0.95
AE23-24	495	712	727	727	0.68	0.98
AE25	479	688	727	727	0.66	0.95
AE26-28	496	714	727	727	0.68	0.98
AW01	266	691	727	727	0.37	0.95
AW02	242	632	727	727	0.33	0.87
AW03-06	273	697	727	727	0.38	0.96
AW07-09	252	657	727	727	0.35	0.90
AW10	227	599	727	727	0.31	0.82
AW11	258	690	727	727	0.35	0.95
AW12-13	252	657	727	727	0.35	0.90
AW14	489	700	727	727	0.67	0.96
AW15	489	702	727	727	0.67	0.97
AW16	463	662	727	727	0.64	0.91
AW17	489	702	727	727	0.67	0.97
AW18	489	700	727	727	0.67	0.96
AW19	479	688	727	727	0.66	0.95
AW20	495	712	727	727	0.68	0.98
AW21	457	653	727	727	0.63	0.90

(注1) 応力度比 = 発生応力/許容限界 (小数第三位を四捨五入)

第3.3.2-8表 ネット取付金物等のうち取付ボルト及び押さえボルトの評価結果 (3/3)

No.	発生応力 (MPa)		許容限界 (MPa)		応力度比 ^(注1) (-)	
	取付ボルト	押さえボルト	取付ボルト	押さえボルト	取付ボルト	押さえボルト
AW22	495	712	727	727	0.68	0.98
AW23	479	688	727	727	0.66	0.95
AW24	444	637	727	727	0.61	0.88
AW25	442	644	727	727	0.61	0.89
AW26	496	714	727	727	0.68	0.98
AHW01	266	691	727	727	0.37	0.95
AHW02	243	631	727	727	0.33	0.87

(注1) 応力度比 = 発生応力/許容限界 (小数第三位を四捨五入)

3.3.3 たわみ評価

竜巻発生時の評価結果を第3.3.3-1表に示す。

すべてのネットにおいて、飛来物の衝突によるネット全体の最大たわみ量(δ_i')は、防護ネットと竜巻防護対象施設の最小離隔距離(L_{min})を下回っている。

第3.3.3-1表 たわみ評価結果(1/3)

No.	最大たわみ量 δ_i' (m)	最小離隔距離 L_{min} (m)	検定比 ^(注1) (-)
AT01-14	1.93	2.97	0.65
AT15	1.95	2.97	0.66
AT16-21	1.93	2.97	0.65
AT22	1.92	2.97	0.65
AT23-49	1.93	2.97	0.65
AS01-03	2.23	5.92	0.38
AS04	2.30	5.92	0.39
AS05-06	2.22	4.86	0.46
AS07-10	2.24	6.10	0.37
AS11-17	2.25	5.17	0.44
AS18-20	2.23	5.16	0.43
AS21	2.01	4.09	0.49
AS22-24	2.22	4.09	0.54
AS25	2.01	4.09	0.49
AS26-28	2.24	5.33	0.42
AN01-04	2.23	5.92	0.38
AN05-07	2.22	4.86	0.46
AN08-11	2.24	19.45	0.12
AN12-18	2.25	5.17	0.44
AN19-21	2.23	5.16	0.43
AN22	2.01	4.09	0.49
AN23-24	2.22	4.09	0.54

(注1) 検定比 = δ_i' / L_{min} (小数第三位を四捨五入)

第3.3.3-1表 たわみ評価結果(2/3)

No.	最大たわみ量 δ_i' (m)	最小離隔距離 L_{\min} (m)	検定比 ^(注1) (-)
AN25	2.01	4.09	0.49
AN26-28	2.24	18.68	0.12
AE01-03	1.94	4.20	0.46
AE04-06	1.94	3.53	0.55
AE07-10	2.04	17.35	0.12
AE11-17	1.96	6.20	0.32
AE18	1.89	3.43	0.55
AE19-20	1.95	3.43	0.57
AE21	1.89	3.43	0.55
AE22	1.92	2.77	0.69
AE23-24	1.94	2.77	0.70
AE25	1.92	2.77	0.69
AE26-28	1.96	16.59	0.12
AW01	1.94	3.23	0.60
AW02	2.23	3.23	0.69
AW03-06	2.04	4.07	0.50
AW07-09	1.96	6.20	0.32
AW10	2.26	6.20	0.36
AW11	1.77	6.20	0.29
AW12-13	1.96	6.20	0.32
AW14	1.89	3.13	0.60
AW15	1.95	3.13	0.62
AW16	1.88	3.13	0.60
AW17	1.95	3.13	0.62
AW18	1.89	3.13	0.60
AW19	1.92	2.47	0.78
AW20	1.94	2.47	0.79
AW21	1.91	2.47	0.77

(注1) 検定比 = δ_i' / L_{\min} (小数第三位を四捨五入)

第3.3.3-1表 たわみ評価結果 (3/3)

No.	最大たわみ量 δ_i' (m)	最小離隔距離 L_{min} (m)	検定比 ^(注1) (-)
AW22	1.94	2.47	0.79
AW23	1.92	2.47	0.78
AW24	1.96	3.31	0.59
AW25	2.25	3.31	0.68
AW26	1.96	3.31	0.59
AHW01	1.94	3.60	0.54
AHW02	2.24	3.60	0.62

(注1) 検定比 = δ_i' / L_{min} (小数第三位を四捨五入)

4. 防護板の強度評価

4.1 評価方法

4.1.1 記号の定義

防護板の強度評価に用いる記号を第4.1.1-1表に示す。

第4.1.1-1表 強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
d	m	評価において考慮する飛来物が衝突する衝突断面の等価直径
K	-	鋼材の材質に関する係数
M	kg	評価において考慮する飛来物の質量
T	m	鋼板の許容限界板厚
v	m/s	評価において考慮する飛来物の飛来速度

4.1.2 評価対象部位

評価対象部位は竜巻防護対象施設への飛来物の衝突を防止し、飛来物の貫通を防止するため、防護板とする。

4.1.3 荷重及び荷重の組合せ

防護板の評価においては、考慮する飛来物として鋼製材を設定する。飛来物の諸元を第4.1.3-1表に示す。また、衝突強度評価における荷重の組合せ第4.1.3-2表に示す。

第4.1.3-1表 飛来物の諸元

飛来物	サイズ 長さ×幅×奥行 (m)	質量 (kg)	水平方向の 飛来速度 (m/s)	鉛直方向の 飛来速度 (m/s)
鋼製材	4.2×0.3×0.2	135	51	34

第4.1.3-2表 荷重の組合せ

評価内容	評価部位	荷重の組合せ
衝突強度評価	防護板	飛来物の衝撃荷重

4.1.4 許容限界

許容限界は、飛来物が防護板に直接衝突した場合の貫通限界厚さを「タービンミサイル評価について（昭和52年7月20日 原子炉安全専門審査会）」で用いられているBRL式を用いて算出する。

なお、評価において考慮する飛来物が衝突する断面の等価直径（下式中のd）は、「竜巻飛来物を模擬した角管の落下衝突による鋼板の貫通評価（2017年日本機械学会論文集）」を適用し、飛来物の周長から換算する。

$$\frac{3}{T^2} = \frac{0.5 \cdot M \cdot v^2}{1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot d^{\frac{3}{2}}}$$

4.1.5 評価方法

防護板の評価方法は、設定した許容限界板厚と設計板厚を比較し、設計板厚が許容限界板厚を上回っていることを確認することとする。

4.2 評価条件

強度評価に用いる条件を第4.2-1表に示す。

なお、評価において考慮する飛来物の飛来速度は、鉛直方向よりも値が大きい水平方向で代表する。

第4.2-1表 評価に用いる条件

記号	単位	数値
d	m	0.311
K	-	1.0
M	kg	135
v	m/s	51



4.3 評価結果

防護板の強度評価結果を第4.3-1表に示す。

防護板の設計板厚は、許容限界板厚を上回っており、飛来物が防護板を貫通しないことから、衝撃荷重に対して十分な構造強度を有している。

第4.3-1表 防護板の強度評価結果

評価対象部位	許容限界板厚 (mm)	設計板厚 (mm)
防護板	7.9	9.0

5. 支持架構の強度評価

5.1 評価方法

5.1.1 記号の定義

支持架構の強度評価に用いる記号を第5.1.1-1表に示す。

第5.1.1-1表 強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積
C	—	風力係数
D	kN	常時作用する荷重
f _b	MPa	曲げに対する許容限界
f _{bx}	MPa	X軸廻り曲げに対する許容限界
f _{by}	MPa	Y軸廻り曲げに対する許容限界
f _c	MPa	圧縮に対する許容限界
f _s	MPa	せん断に対する許容限界
f _t	MPa	引張に対する許容限界
G	—	ガスト影響係数
L _s	N/m ² /cm	積雪荷重
q	N/m ²	設計用速度圧
V _D	m/s	設計竜巻の最大風速
W _M	N	飛来物の衝撃荷重
W _W	N	風圧力による荷重
σ _b	MPa	支持架構の曲げ応力度
σ _{bx}	MPa	支持架構のX軸廻り曲げ応力度
σ _{by}	MPa	支持架構のY軸廻り曲げ応力度
σ _c	MPa	支持架構の圧縮応力度
σ _t	MPa	支持架構の引張応力度
τ _s	MPa	支持架構のせん断応力度
ρ	kg/m ³	空気密度

5. 1. 2 評価対象部位

支持架構の評価対象部位は、「2. 2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

飛来物の衝突箇所としては、部材の中央位置を選定する。これは、衝突により支持架構に発生するひずみ量を大きくするため、被衝突部材の曲げモーメントが最大となる位置を選定したためである。

支持機能評価においては、支持架構を構成する主要部材に発生する曲げモーメントが最大となるよう、部材長さ（支持スパン）が最長となる部材を選定することを基本とする。

(1) 衝突評価の評価対象部位

飛来物が支持架構の主要部材に衝突した場合に、被衝突部材が破断し貫通するおそれがあることから、飛来物が支持架構の主要部材に直接衝突した場合についての衝突解析を実施し、評価を行う。

飛来物防護ネットの衝突評価対象部位を第5. 1. 2-1表に示す。

(2) 支持機能評価の評価対象部位

a. 部材の支持機能評価

飛来物が支持架構の主要部材に衝突した場合に、被衝突部材の端部が破断すると、飛来物は破断した部材と共に、竜巻防護対象施設に落下するおそれがあることから、被衝突部材の端部を評価対象とする。

飛来物が支持架構の主要部材に直接衝突した場合についての衝突解析を実施し、被衝突部材の端部のひずみ評価を行う。

飛来物防護ネットの部材の支持機能評価対象部位を第5. 1. 2-2表に示す。

b. 支持架構全体の支持機能評価

飛来物が支持架構の主要部材に衝突した場合に、被衝突部材の柱脚部が破断すると、支持架構全体の支持機能が失われるおそれがあることから、被衝突部材の柱脚部を評価対象とする。

飛来物が支持架構の主要部材に直接衝突した場合についての衝突解析を実施し、被衝突部材の柱脚部の応力評価を行う。

飛来物防護ネットの支持架構全体の支持機能評価対象部位を第5. 1. 2-3表に示す。

第5.1.2-1表 飛来物防護ネットの衝突評価対象部位

対象		仕様 (mm)	材質
支持架構	梁	H-400×400×13×21	SN490B
	柱	H-400×400×13×21 □-500×500×28	SN490B BCP325

第5.1.2-2表 飛来物防護ネットの部材の支持機能評価対象部位

対象		仕様 (mm)	材質
支持架構	梁端部 (柱梁接合部)	H-400×400×13×21	SN490B

第5.1.2-3表 飛来物防護ネットの支持架構全体の支持機能評価対象部位

対象		仕様 (mm)	材質
支持架構	柱脚部1	□-500×500×28	BCP325
	柱脚部2	H-400×400×13×21	SN490B

5.1.3 荷重及び荷重の組合せ

(1) 荷重の設定

a. 固定荷重 (D)

固定荷重は、支持架構、防護ネット、防護板等の自重及び積載荷重とする。

b. 積雪荷重 (L_s)

積雪荷重は、積雪量190cm、単位重量0.03kN/m²/cmとし、竜巻時の低減率は0.35として考慮する。

c. 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重は、竜巻影響評価ガイドに定められた最大風速100m/sを考慮して算出した風力係数Cを用いて算出する。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_D^2$$

d. 飛来物の衝撃荷重 (W_M)

飛来物の衝撃荷重については、第4.1.3-1表に示す飛来物の諸元を基に算定する。

(2) 荷重の組合せ

荷重の組合せを第5.1.3-2表に示す。

第5.1.3-2表 評価において考慮する荷重の組合せ

評価項目		固定荷重 D	積雪荷重 L _s	飛来物の 衝撃荷重 W _M	風圧力による 荷重 W _w	荷重の組合せ
衝突評価		○	○	○	○	D+0.35L _s +W _w +W _M
支持機能 評価	被衝突部材	○	○	○	○	
	支持架構 全体	○	○	○	○	

<凡例> ○：考慮する，－：考慮しない

5.1.4 許容限界

許容限界は、「5.1.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮して設定する。

(1) 衝突評価

衝突評価における許容限界として、破断ひずみを設定する。

破断ひずみはNEI07-13に従い、 $0.14/TF$ （多軸性係数）とする。ここで、多軸性係数について、支持架構部材は $TF = 2$ とする。従って、破断ひずみは 0.07 となる。

(2) 支持機能評価

a. 部材の支持機能評価

部材の支持機能評価における許容限界として、破断ひずみを設定する。

破断ひずみはNEI07-13に従い、 $0.14/TF$ （多軸性係数）とする。ここで、多軸性係数について、支持架構部材は $TF = 2$ とする。従って、破断ひずみは 0.07 となる。

b. 支持架構全体の支持機能評価

支持架構全体の支持機能評価における許容限界として、「鋼構造設計規準」（2005改定）に基づくものとして、応力度比は 1.0 以下とする。

5.1.5 評価方法

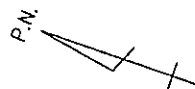
飛来物防護ネットの評価は、支持架構の評価モデルを用いて、衝突評価、強度評価及び波及的影響評価を行い、許容限界を超えないことを確認する。

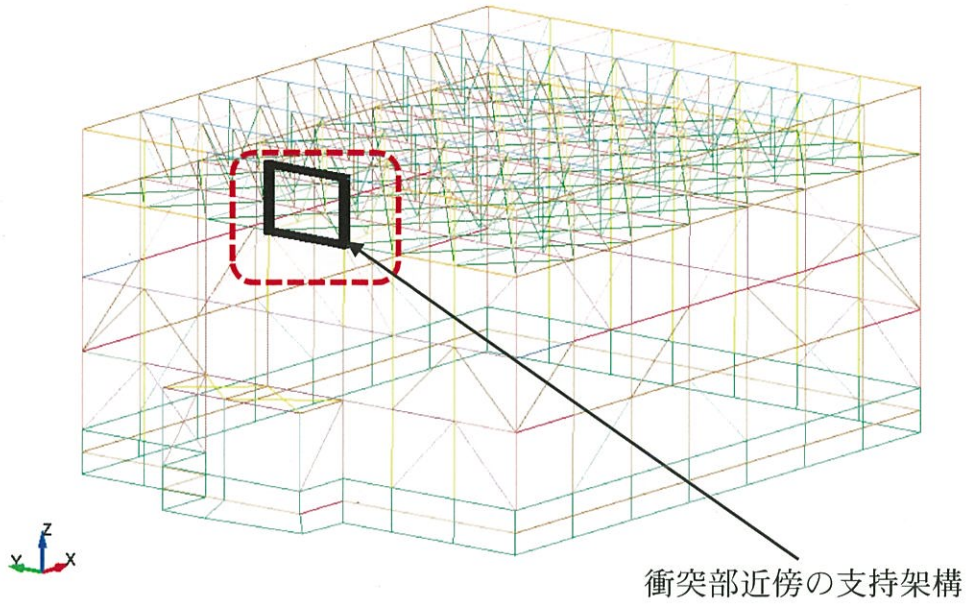
(1) 評価モデル

計算においては、支持架構全体を三次元フレームモデルによりモデル化し、解析コード「LS-DYNA (R. 7. 1. 2)」を用いて評価を実施する。

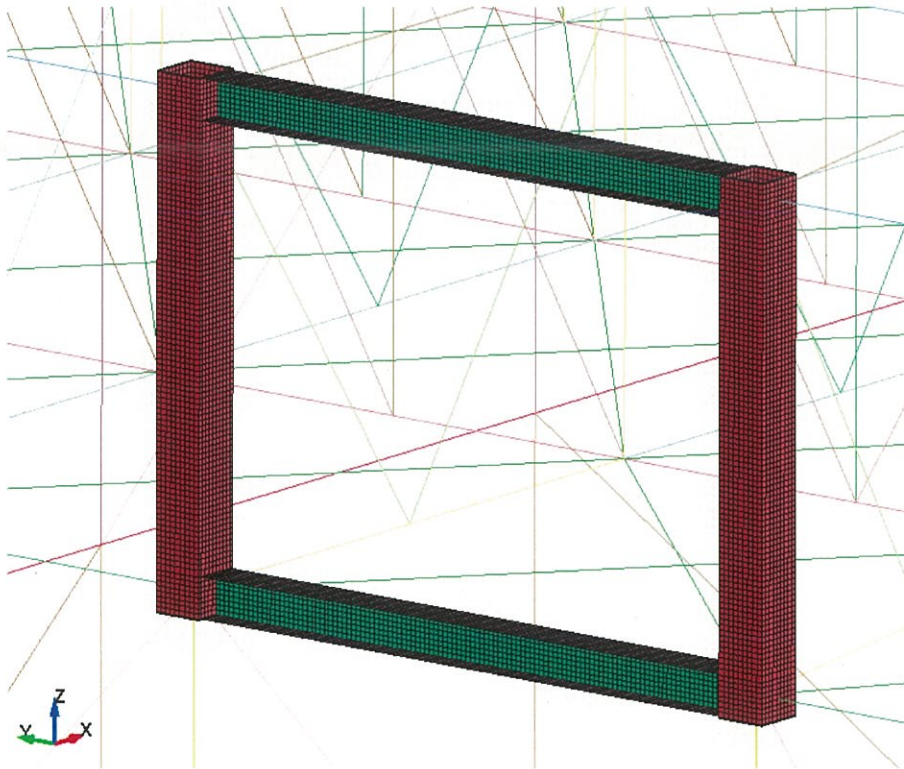
支持架構の評価モデルを第5.1.5-1図、飛来物の解析モデルを第5.1.5-2図に示す。

なお、評価に用いる解析コード「LS-DYNA (R. 7. 1. 2)」の検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「V-4 計算機プログラム(解析コード)の概要」に示す。

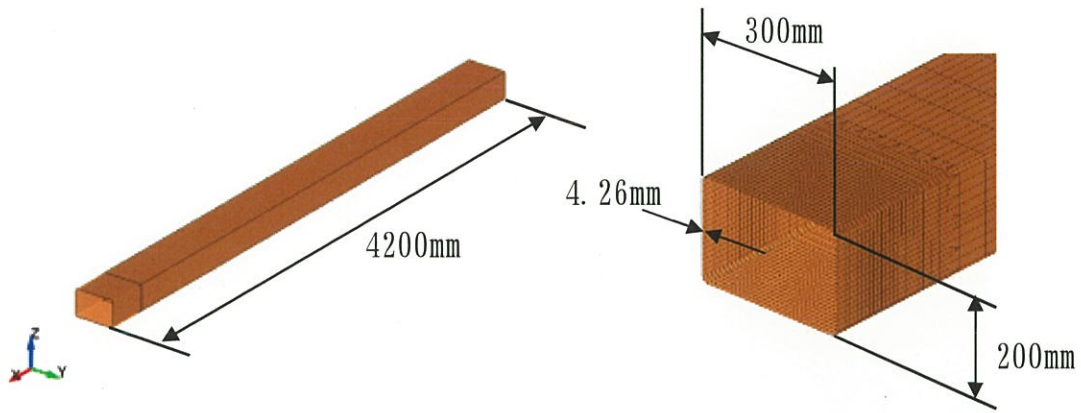




第5. 1. 5-1図 飛来物防護ネットの評価モデル図 (1/2)



第5. 1. 5-1図 飛来物防護ネットの評価モデル図 (2/2)



第5. 1. 5-2図 飛来物の解析モデル図

(2) 材料モデル

材料モデルでは、支持架構の破断ひずみを設定し、破断ひずみを超えた要素は消去することにより部材の破壊を表現する。鋼材の応力-ひずみ関係はバイリニア型とし、鋼材の材料モデルにおける折れ点の強度は、JISの規格値（降伏応力、引張強さ）の下限値に対してNEI07-13に従って動的増加率を乗じた値とする。動的増加率はNEI07-13に基づき、降伏応力1.29、引張強さ1.10とする。

また、飛来物は保守的に破断ひずみを超えても要素が消去しないものとし、破断ひずみはNEI07-13に従い $0.14/TF$ （多軸性係数）とする。ここで、多軸性係数について、支持架構部材は $TF = 2$ 、飛来物は $TF = 1$ とする。

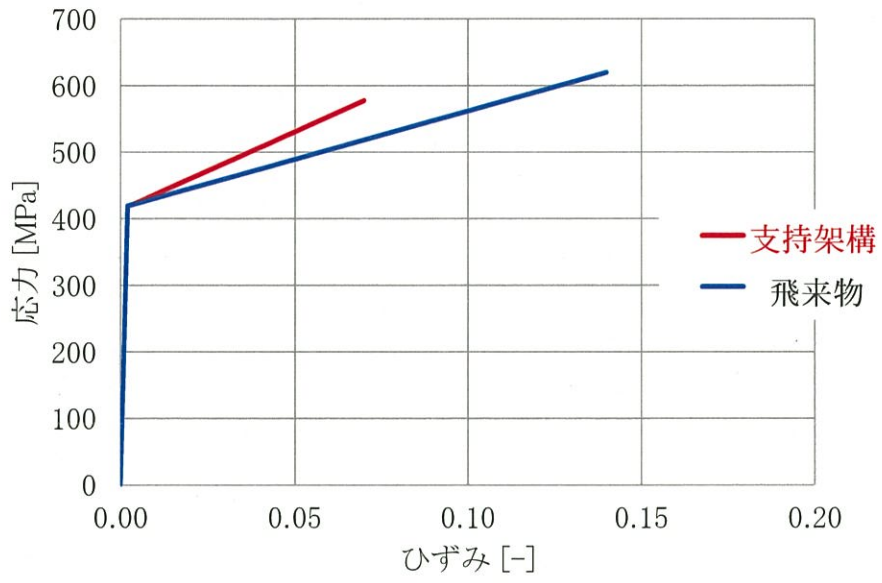
材料モデルの降伏応力及び引張強さの強度を第5.1.5-1表に、材料モデルにおける破断ひずみを第5.1.5-2表に、支持架構及び飛来物の応力-ひずみ線図を第5.1.5-3図に示す。

第5.1.5-1表 材料モデルの降伏応力及び引張強さ（単位：MPa）

種別	材質	規格値		材料モデル	
		降伏応力	引張強さ	降伏応力	引張強さ
支持架構	SN490B	325	490	419	578
飛来物	SN490B	325	490	420	620

第5.1.5-2表 材料モデルにおける破断ひずみ

種別	材質	破断ひずみ
支持架構	SN490B	0.07



第5. 1. 5-3図 支持架構及び飛来物の応力-ひずみ線図

(3) 評価式

a. 軸力及び曲げモーメントに対する評価方法

軸力及び曲げモーメントが生じる部材は、座屈を考慮し、部材に生じる軸応力度及び曲げ応力度の組合せ応力が、許容限界を超えないことを確認する。

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1.0 \quad \text{または} \quad \frac{\sigma_t}{f_t} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1.0$$

b. せん断力に対する評価方法

せん断力が生じる部材は、部材に生じるせん断応力度が、許容限界を超えないことを確認する。

$$\frac{\tau_s}{f_s} \leq 1.0$$



5.2 評価条件

(1) 材料定数

使用材料の材料定数を第5.2-1表に示す。材料定数は、「鋼構造設計規準」(2005改定)に基づいて設定する。

第5.2-1表 材料定数

部材	縦弾性係数 (MPa)	ポアソン比
支持架構	2.05×10^5	0.3
飛来物	2.05×10^5	0.3

(2) 使用材料の許容限界

使用材料の許容限界を、第5.2-2表に示す。

第5.2-2表 使用材料の許容限界

材料	基準強度F (MPa)	備考
SN490B	325	短期応力の許容応力度を1.1倍した値を許容限界として設定
BCP325		

5.3 強度評価結果

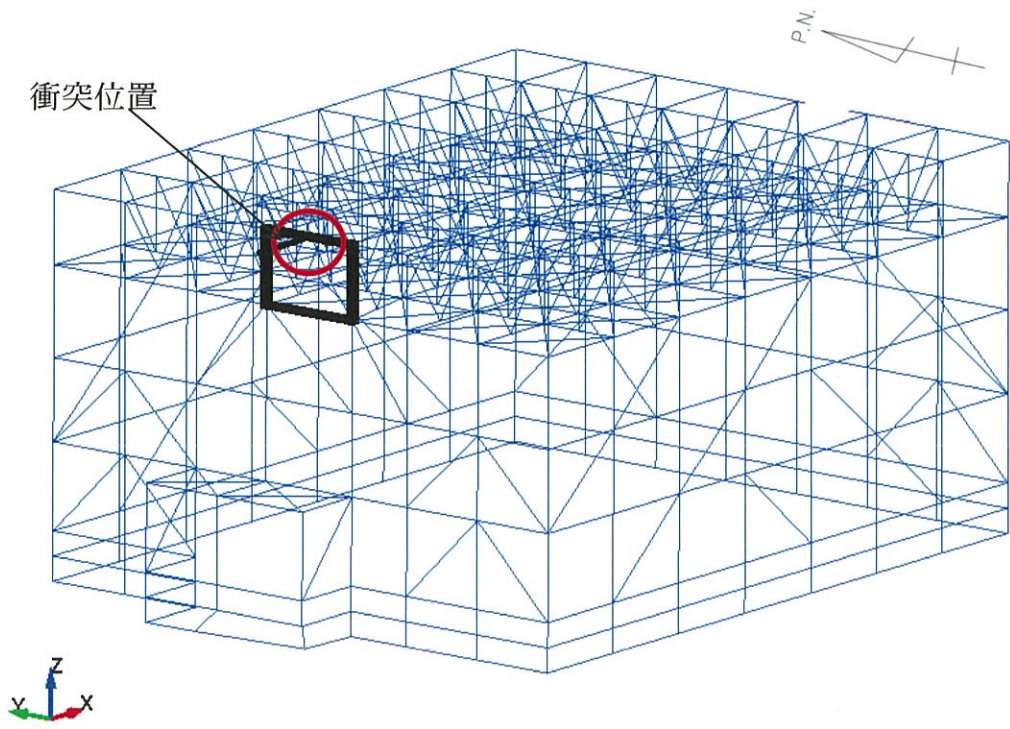
(1) 衝突評価

飛来物防護ネットの衝突評価結果を第5.3-1表に示す。また、飛来物衝突位置図を第5.3-1図、飛来物が飛来物防護ネットから離れる直前の衝突位置拡大図を第5.3-2図及び飛来物防護ネットに最大ひずみが発生する時刻での衝突位置拡大図を第5.3-3図に示す。

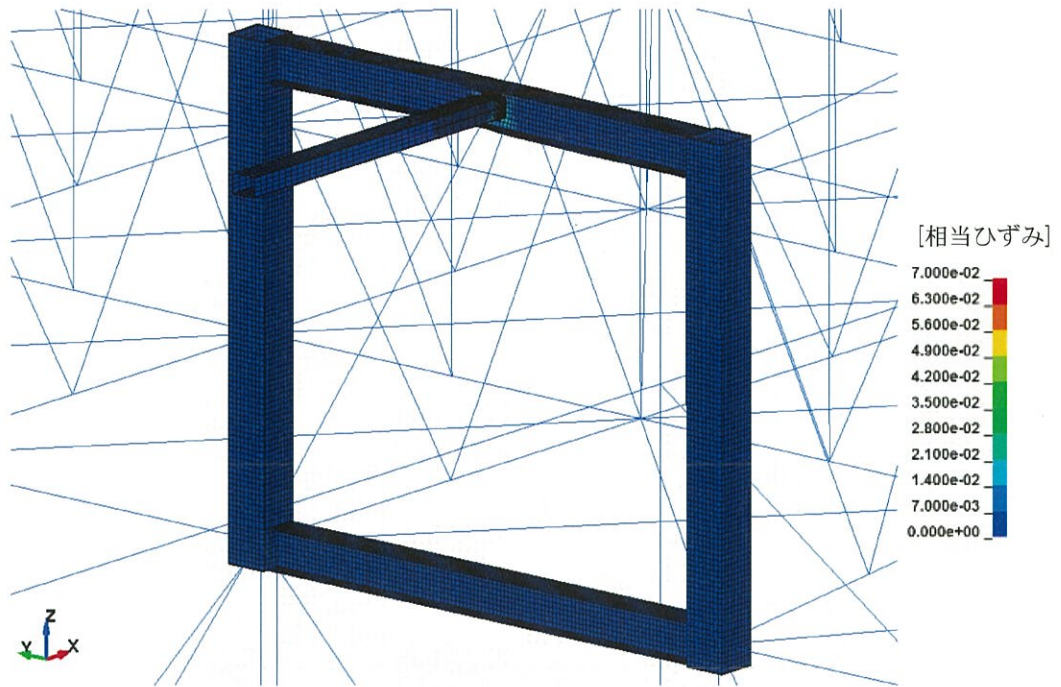
評価結果は許容限界以下となっており、飛来物は評価対象部位を貫通しないことから、衝撃荷重に対して十分な構造強度を有している。

第5.3-1表 飛来物防護ネットの衝突評価結果

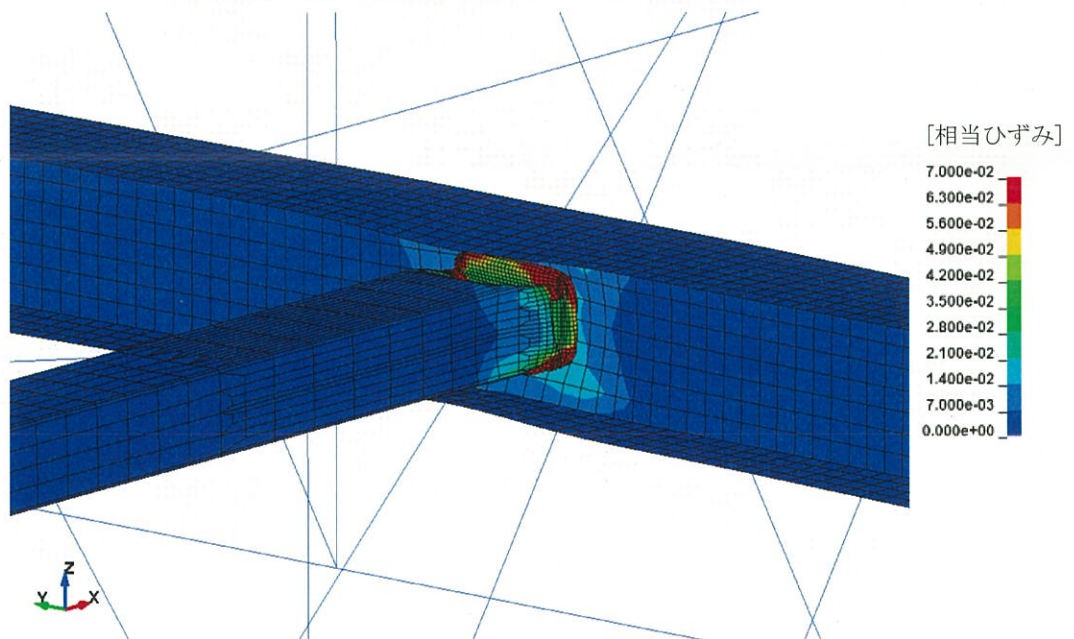
対象	部材		相当ひずみ	
			評価結果	許容限界
飛来物防護ネット	支持架構	梁中央	0.028	0.07



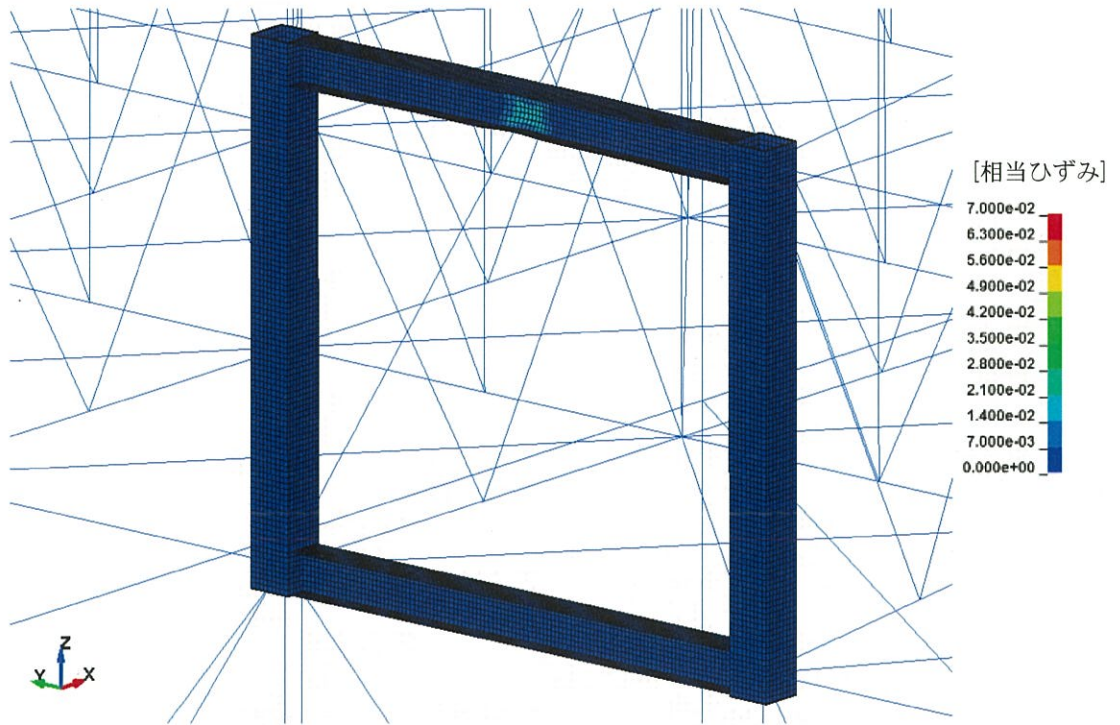
第5.3-1図 飛来物衝突位置図



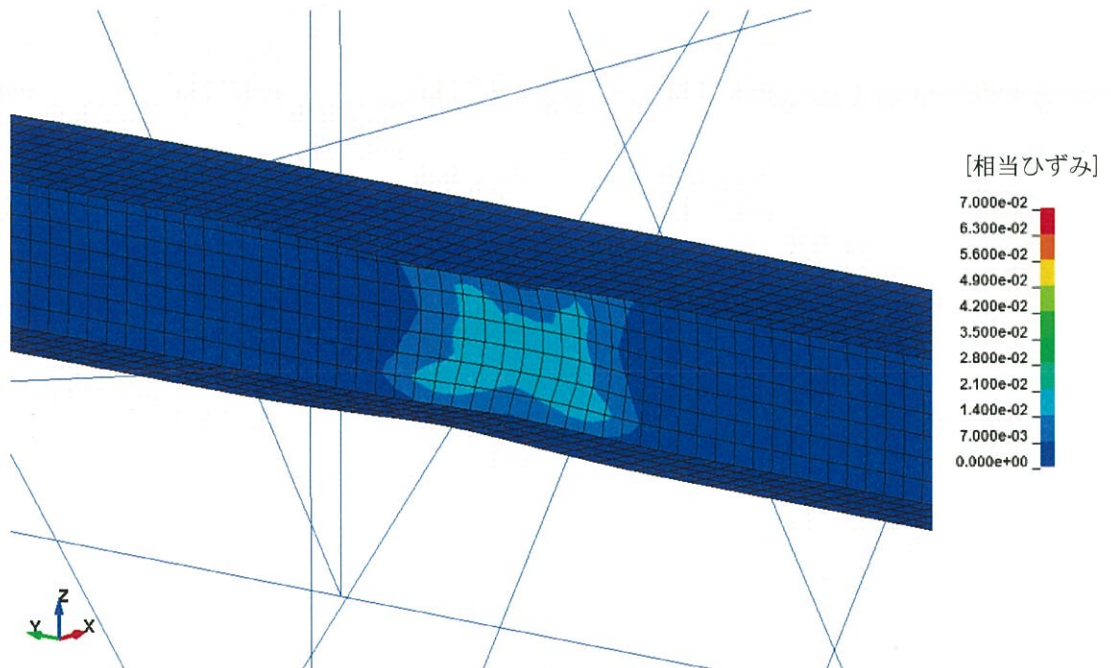
第5.3-2図 衝突位置拡大図 (1/2)
(飛来物が飛来物防護ネットから離れる直前)



第5.3-2図 衝突位置拡大図 (2/2)



第5. 3-3図 衝突位置拡大図 (1/2)
(飛来物防護ネットに最大ひずみが発生する時刻)



第5. 3-3図 衝突位置拡大図 (2/2)

(2) 支持機能評価

a. 部材の支持機能評価

飛来物防護ネットの部材の支持機能評価結果を第5.3-2表に示す。また、飛来物衝突位置図を第5.3-1図に、衝突位置拡大図を第5.3-2図、第5.3-3図に示す。

評価結果が許容限界を超えないことから、部材の支持機能に対して十分な構造強度を有している。

第5.3-2表 飛来物防護ネットの部材の支持機能評価結果

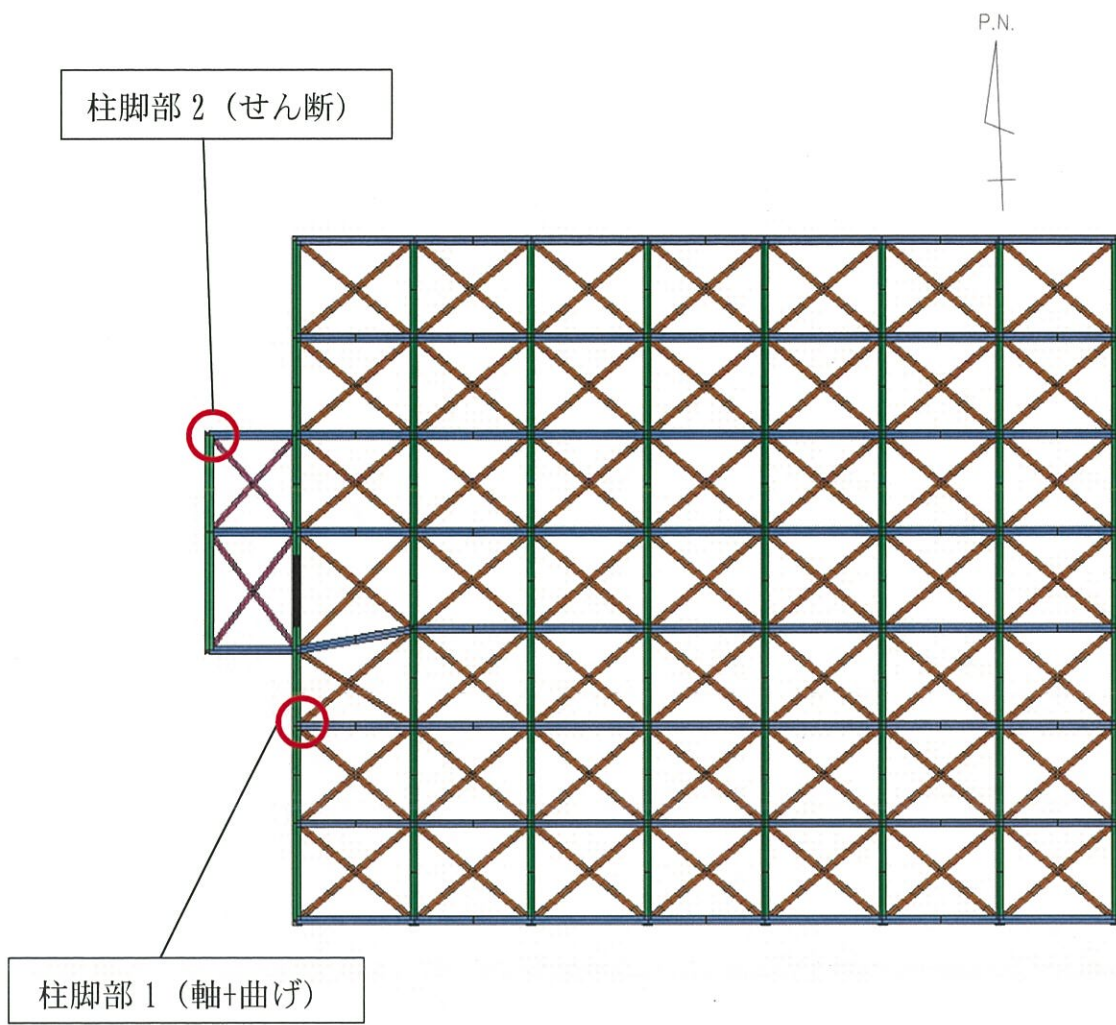
対象	部材		相当ひずみ	
			評価結果	許容限界
飛来物防護ネット	支持架構	梁端部 (柱梁接合部)	0.024	0.07

b. 支持架構全体の支持機能評価

飛来物防護ネットの支持架構全体の支持機能評価結果を第5.3-3表に示す。また、最大応力度比の発生箇所を第5.3-4図に示す。評価結果が許容限界を超えないことから、支持架構全体の支持機能に対して十分な構造強度を有している。

第5.3-3表 支持架構全体の支持機能評価結果

対象	部 材	応力度	発生応力度 (MPa)	許容応力度 (MPa)	応力度比
飛来物防護ネット 支持架構	柱脚部1	引 張	$\sigma_t =$ —	$f_t =$ 357	—
		圧 縮	$\sigma_c =$ 18.59	$f_c =$ 199	0.10
		曲 げ	$\sigma_{bx} =$ 4.97	$f_{bx} =$ 357	0.02
			$\sigma_{by} =$ 101.39	$f_{by} =$ 357	0.29
		せ ん 断	$\tau_s =$ 9.66	$f_s =$ 206	0.05
		組合せ(引張+曲げ)	(応力度比) —	(許容値) 1.00	—
		組合せ(圧縮+曲げ)	(応力度比) 0.41	(許容値) 1.00	0.41
	柱脚部2	引 張	$\sigma_t =$ —	$f_t =$ 357	—
		圧 縮	$\sigma_c =$ 30.83	$f_c =$ 285	0.11
		曲 げ	$\sigma_{bx} =$ 4.64	$f_{bx} =$ 357	0.02
			$\sigma_{by} =$ 28.26	$f_{by} =$ 357	0.08
		せ ん 断	$\tau_s =$ 134.04	$f_s =$ 206	0.65
		組合せ(引張+曲げ)	(応力度比) —	(許容値) 1.00	—
		組合せ(圧縮+曲げ)	(応力度比) 0.21	(許容値) 1.00	0.21



第5.3-4図 飛来物防護ネットの最大応力度比の発生箇所

V－別添2 火山への配慮が必要な施設の強度に関する説明書

V－別添2－1 火山への配慮が
必要な施設の強度計算書

1. 概要

本資料は、「再処理施設の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という。）第八条に適合し、技術基準規則第三十六条に規定される「重大事故等対処設備」を踏まえた重大事故等対処設備に配慮する設計とするため、添付書類「VI-1-1-1-3-3 設計対処施設及び降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」に設定している設計対処施設及び降下火砕物の影響を考慮する施設が、降下火砕物に対して構造健全性を維持することを確認するための強度評価方針について説明するものである。

強度評価は、添付書類「VI-1-1-1-3-1 火山への配慮に関する基本方針」に示す適用規格を用いて実施する。

設計対処施設及び降下火砕物の影響を考慮する施設に対する具体的な計算の方法及び結果は、添付書類「V-別添2-2 火山への配慮が必要な施設の強度計算書」に示す。

2. 強度評価の基本方針

強度評価は、「2.1 強度評価の対象施設」に示す強度評価の対象施設（以下「評価対象施設」という。）について、「4.1 荷重及び荷重の組合せ」で示す降下火砕物の堆積による荷重と組み合わせべき他の荷重による組合せ荷重により発生する応力等が、「4.2 許容限界」で示す許容限界内にあることを、「5. 強度評価方法」で示す評価方法及び考え方を使用し、「6. 適用規格」で示す適用規格を用いて確認する。

2.1 強度評価の対象施設

添付書類「VI-1-1-1-3-3 設計対処施設及び降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」の「4. 要求機能及び性能目標」にて設定している構造物への荷重を考慮する施設のうち、評価対象施設を第2.1-1表に示す。

安全冷却水系については、添付書類「VI-1-1-1-2 竜巻への配慮に関する説明書」の「VI-1-1-1-2-3 評価対象施設の設計方針」に記載している竜巻防護対策設備である飛来物防護ネットに覆われているが、飛来物防護ネットの特性を考慮し、安全冷却水系及び飛来物防護ネットについて評価の対象とする。

第 2.1-1 表 評価対象施設

施設分類	評価対象施設
設備	(1) 安全冷却水系 (2) 飛来物防護ネット

3. 構造強度設計

添付書類「VI-1-1-1-3-1 火山への配慮に関する基本方針」で設定している降下火砕物特性に対し、「3.1 構造強度の設計方針」で設定している構造物への荷重を考慮する施設が、構造強度設計上の性能目標を達成するように、添付書類「VI-1-1-1-3-3 設計対処施設及び降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」の「5. 機能設計」で設定している各施設が有する機能を踏まえて、構造強度の設計方針を設定する。

各施設の構造強度の設計方針を設定し、想定する荷重及び荷重の組合せを設定し、それらの荷重に対し、各施設の構造強度を保持するように構造設計と評価方針を設定する。

3.1 構造強度の設計方針

添付書類「VI-1-1-1-3-3 設計対処施設及び降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」の「4. 要求機能及び性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を達成するための設計方針を示す。

降下火砕物に対する防護設計を行うために、降下火砕物を湿潤状態とした場合における荷重、個々の施設に常時作用する荷重、運転時荷重及び火山と同時に発生し得る自然現象による荷重を組み合わせた荷重(以下「設計荷重(火山)」という。)を設定する。

(1) 設備

a. 安全冷却水系

安全冷却水系は、添付書類「VI-1-1-1-3-3 設計対処施設及び降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」の「4. 要求機能及び性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計荷重(火山)に対し、降下火砕物堆積時の機能維持を考慮して、設備の主要な構造部材が構造健全性を維持する設計とする。

b. 飛来物防護ネット

飛来物防護ネットは、添付書類「VI-1-1-1-2-3 評価対象施設の設計方針」の「3. 要求機能及び性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、設計荷重(火山)に対し、安全冷却水系に波及的影響を与えないよう、設備の主要な構造部材が構造健全性を維持する設計とする。

3.2 機能維持の方針

添付書類「VI-1-1-1-3-3 設計対処施設及び降下火砕物の影響を考慮する施設の設計方針」の「4. 要求機能及び性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を達成するために、「3.1 構造強度の設計方針」に示す構造を踏まえ「添付書類「VI-1-1-1-3-1 火山への配慮に関する基本方針」の「2.1.3(2) 荷重の組

合せ及び許容限界」で設定している荷重条件を適切に考慮して、各施設の構造設計及びそれを踏まえた評価方針を設定する。各施設の評価対象部位について第 3. 2-1 表に示す。

新 R ① JN 火 G V 00406 C

新 R ① JN 火 G V 00407 C



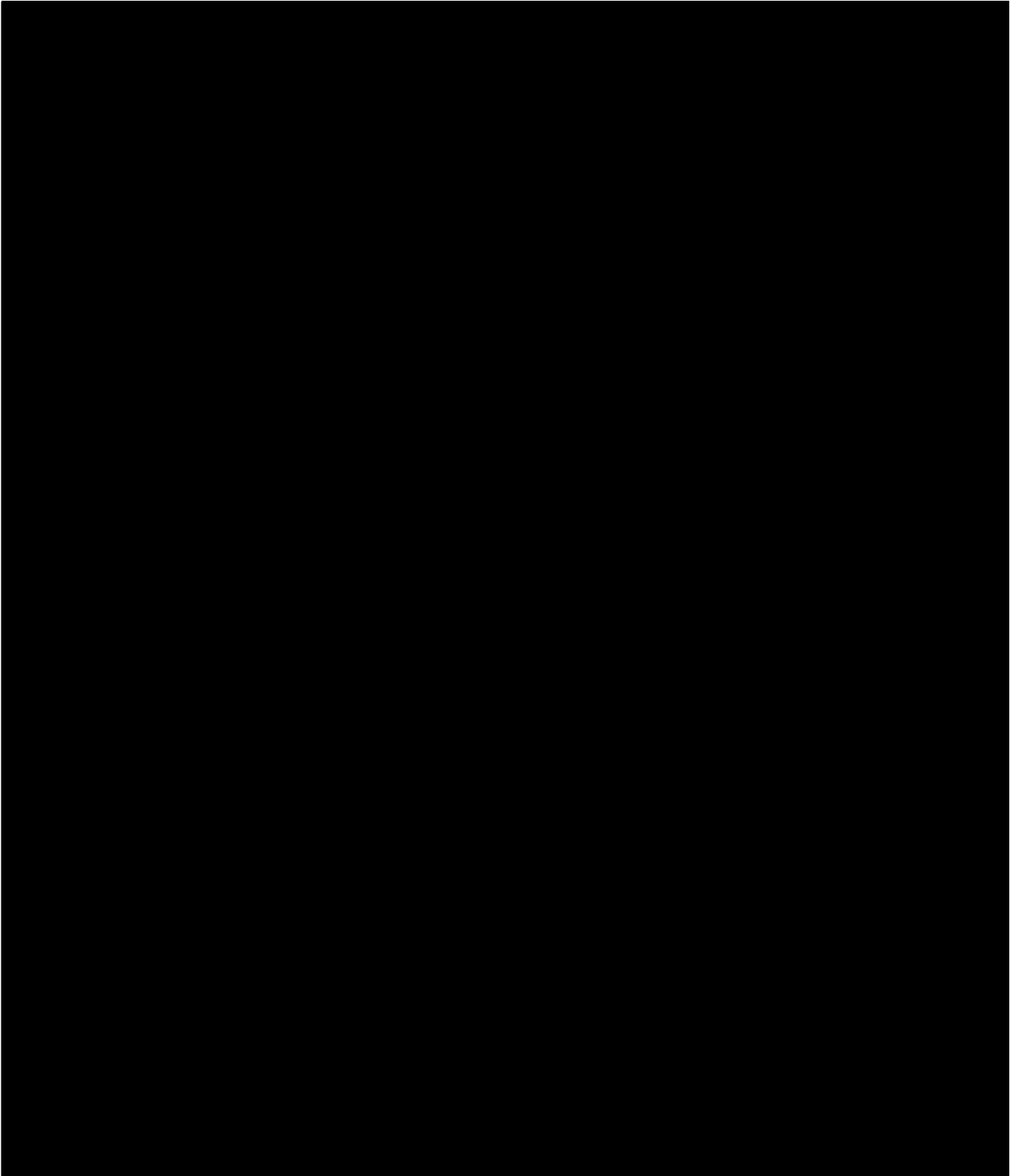


新 R ① JN 火 G V 00408 C



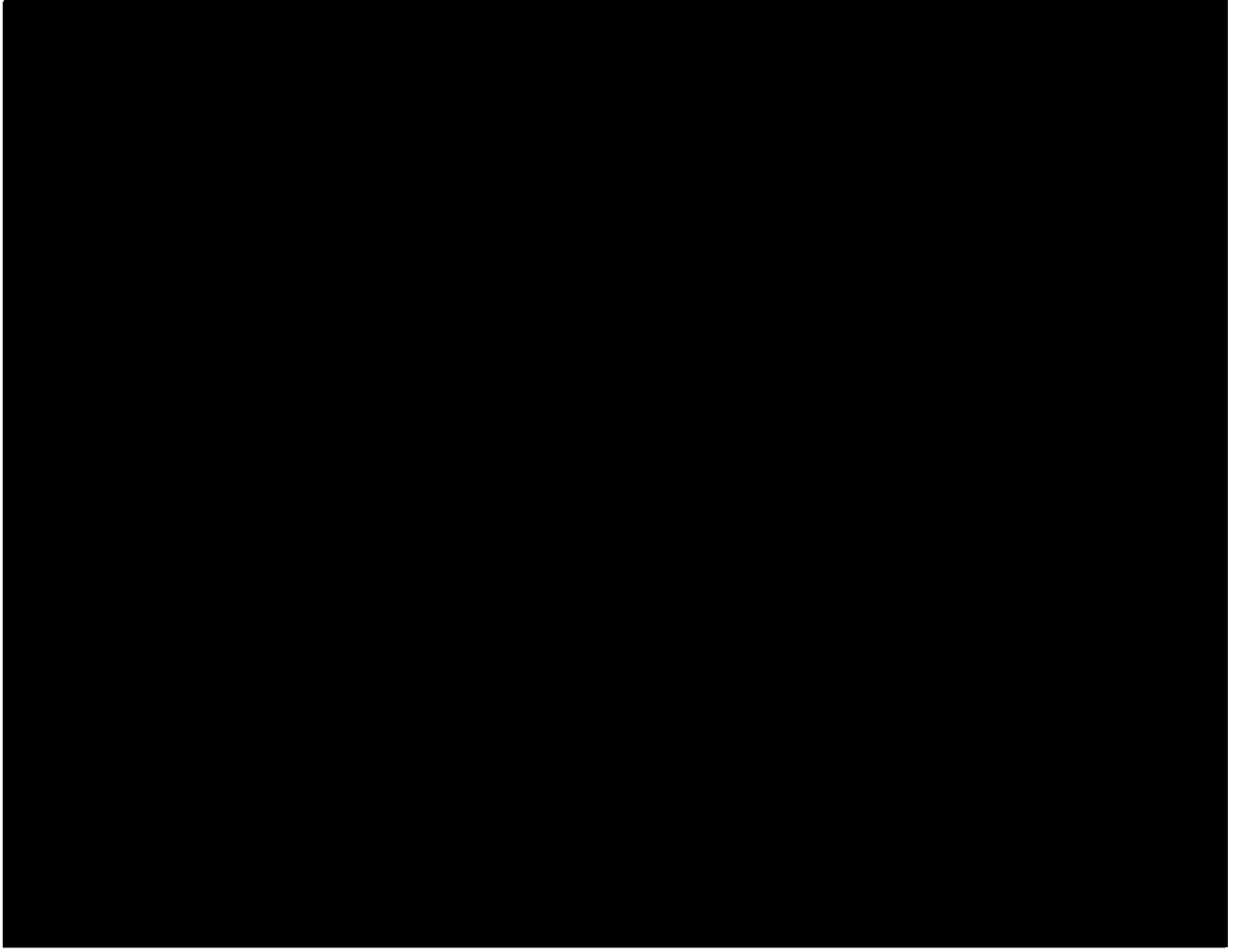


新 R ① JN 火 G V 00409 C



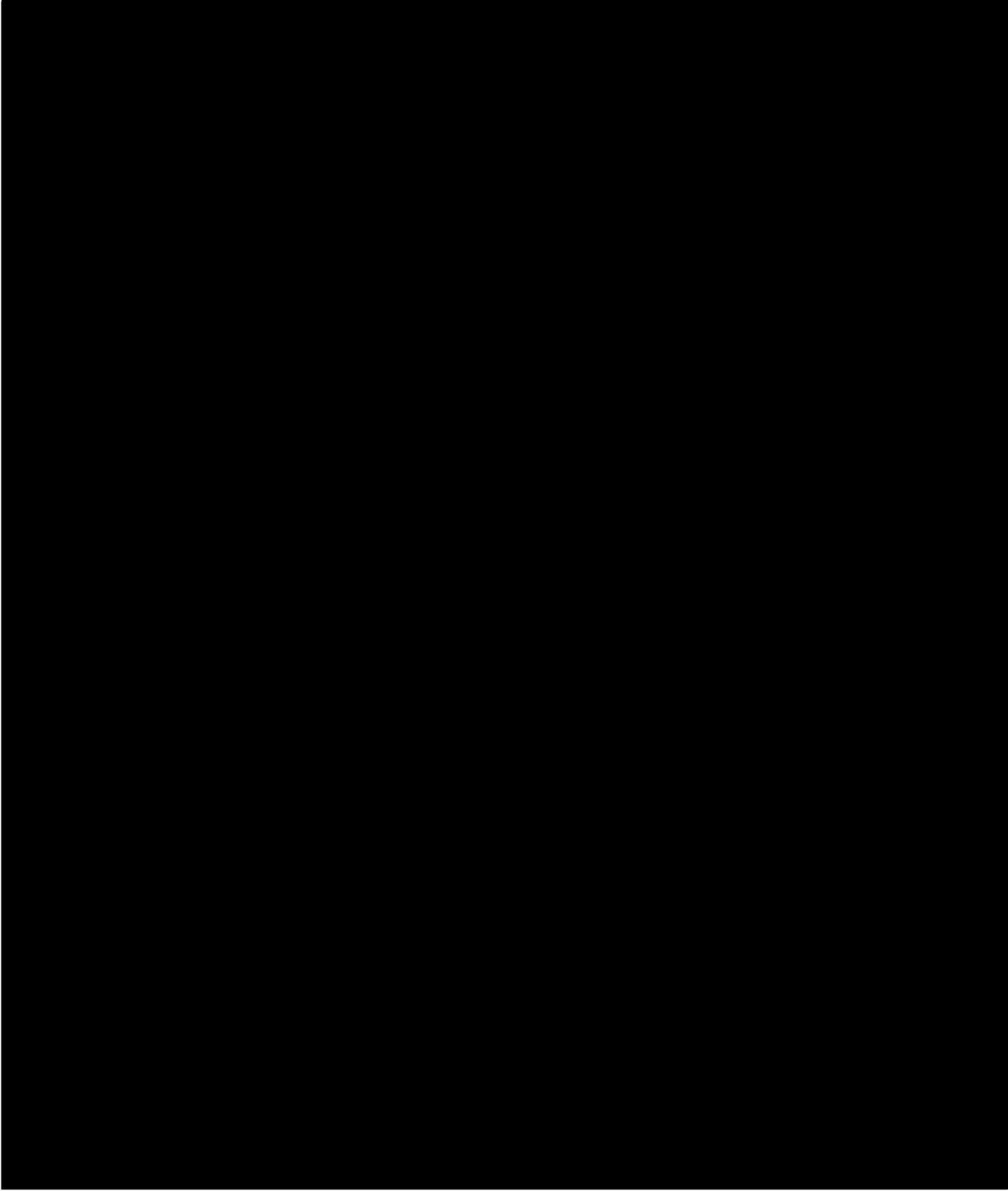


新 R ① JN 火 G V 00410 C





新 R ① JN 火 G V 00411 C



4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界

評価対象施設の強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せを「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に、許容限界を「4.2 許容限界」に示す。

4.1 荷重及び荷重の組合せ

評価対象施設の強度評価にて考慮する荷重は、添付書類「VI-1-1-1-3-1 火山への配慮に関する基本方針」にて設定しており、それらを「(1) 荷重の種類」に示す。また、評価対象施設の強度評価にて考慮する荷重の組合せの考え方は、添付書類「VI-1-1-1-3-1 火山への配慮に関する基本方針」にて定めており、それらを「(2) 荷重の組合せ」に示す。

(1) 荷重の種類

a. 常時作用する荷重

常時作用する荷重は、添付書類「VI-1-1-1-3-1 火山への配慮に関する基本方針」で設定している常時作用する荷重に従って、持続的に生じる荷重である自重及び積載荷重とする。

b. 降下火砕物の堆積による荷重

降下火砕物の堆積による荷重は、添付書類「VI-1-1-1-3-1 火山への配慮に関する基本方針」の降下火砕物の特性及び降下火砕物の堆積による荷重を踏まえて、湿潤密度 $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ の降下火砕物が 55cm 堆積した場合の荷重とする。

c. 積雪荷重

積雪深は、添付書類「VI-1-1-1-1-1 再処理施設の自然現象等に対する損傷の防止に関する基本方針」に示す組み合わせる積雪深を踏まえて、青森県建築基準法施行細則(昭和36年2月9日青森県規則第20号)による六ヶ所村の垂直積雪量 150cm とする。積雪荷重については、建築基準法施行令により、積雪量 1cm ごとに $30\text{N}/\text{m}^2$ が作用することを考慮し設定する。

d. 風荷重

風荷重は、添付書類「VI-1-1-1-1-1 再処理施設の自然現象等に対する損傷の防止に関する基本方針」に示す組み合わせる風速を踏まえて、建築基準法施行令に基づく平成12年建設省告示第1454号に定められた六ヶ所村の基準風速である $34\text{m}/\text{s}$ とする。風荷重については、施設の形状により風力係数等が異なるため、施設ごとに設定する。

e. 運転時の状態で施設に作用する荷重

運転時の状態で施設に作用する荷重としては、運転時の状態でプール・ピット・貯蔵区域に作用している温度による荷重とする。

(2) 荷重の組合せ

a. 自然現象の荷重

自然現象の荷重については、事業指定(変更許可)を受けたとおり、降下火砕物の堆積による荷重及び積雪荷重並びに降下火砕物の堆積による荷重及び風荷重の組合せを、施設の形状、配置に応じて考慮する。

なお、降下火砕物、積雪及び風を一括して組み合わせるケースの評価により、便宜的に上記2ケースの評価に代えることも可とする。

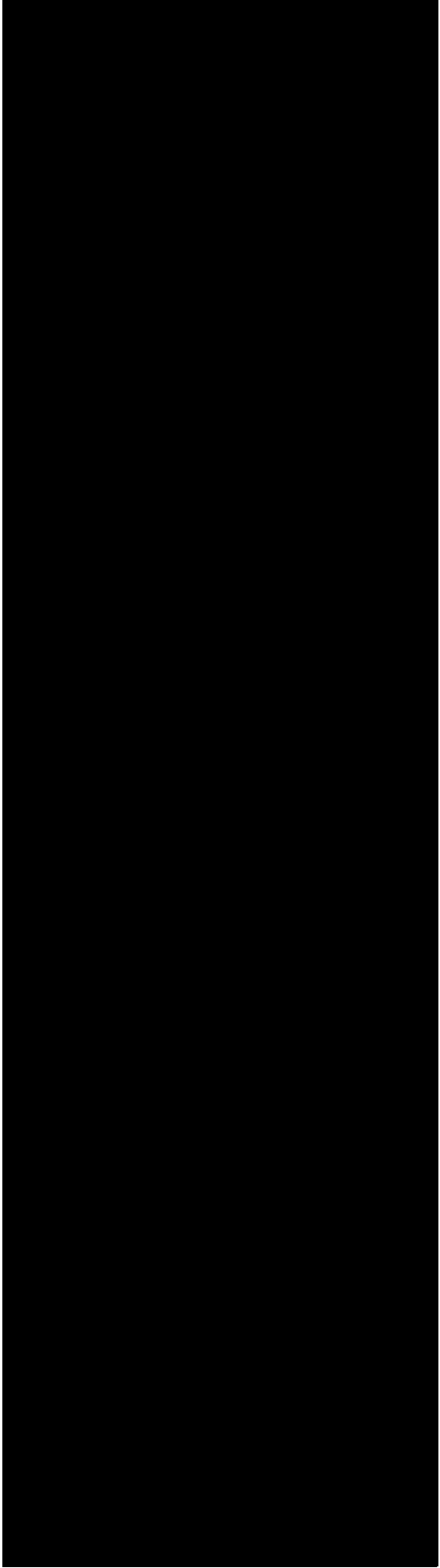
b. 評価対象施設の荷重の組合せ

評価対象施設の荷重の組合せについては、自然現象の荷重及び常時作用する荷重を組み合わせる。

なお、常時作用する荷重、積雪荷重、風荷重及び運転時の状態で作用する荷重については、組み合わせることで降下火砕物の堆積による荷重の抗力となる場合には、評価結果が厳しい結果を与えるように荷重の算出において考慮しないこととする。

上記を踏まえ、対象施設の強度評価における荷重の組合せの設定については、施設の設置状況及び構造等を考慮し設定する。評価対象施設の荷重の組合せの考え方を第4.1-1表に示す。

新R ① JN 火G V 00414 C



(3) 荷重の算定方法

「4.1(1) 荷重の種類」で設定している荷重の算定方法を以下に示す。

a. 強度評価に用いる記号

第3.1-1表 強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
W_w	N	風荷重
q	N/m^2	設計用速度圧
G	—	ガスト影響係数
C	—	風力係数（「建築基準法及び同施行令」に基づき設定する。）
A	m^2	風の受圧面積
V_0	m/s	基準風速
H	m	建築物の高さと軒の高さとの平均
E'	—	建築基準法施行令第87条第2項に規定する数値
E_r	—	建設省告示第1454号第2項の規定によって算出した平均風速の高さ方向の分布を表わす係数
Z_b	m	地表面粗度区分に応じて建設省告示第1454号に掲げる数値
Z_G	m	地表面粗度区分に応じて建設省告示第1454号に掲げる数値
α	—	地表面粗度区分に応じて建設省告示第1454号に掲げる数値

b. 降下火砕物の堆積による荷重

降下火砕物の堆積による荷重を第 4. 1-2 表に示す。

第4. 1-2表 降下火砕物の堆積による荷重

堆積厚さ	降下火砕物の堆積による荷重
55cm	130N/m ² /cm

c. 風荷重

風荷重は、下式により算定する。

$$W_w = q \cdot C \cdot A$$

ここで、

$$q = 0.6 \cdot E' \cdot V_0^2$$

$$E' = E_r^2 \cdot G$$

$$E_r = 1.7 \cdot (H/Z_G)^\alpha$$

d. 積雪荷重

積雪深さは建築基準法による六ヶ所村の積雪深とする。

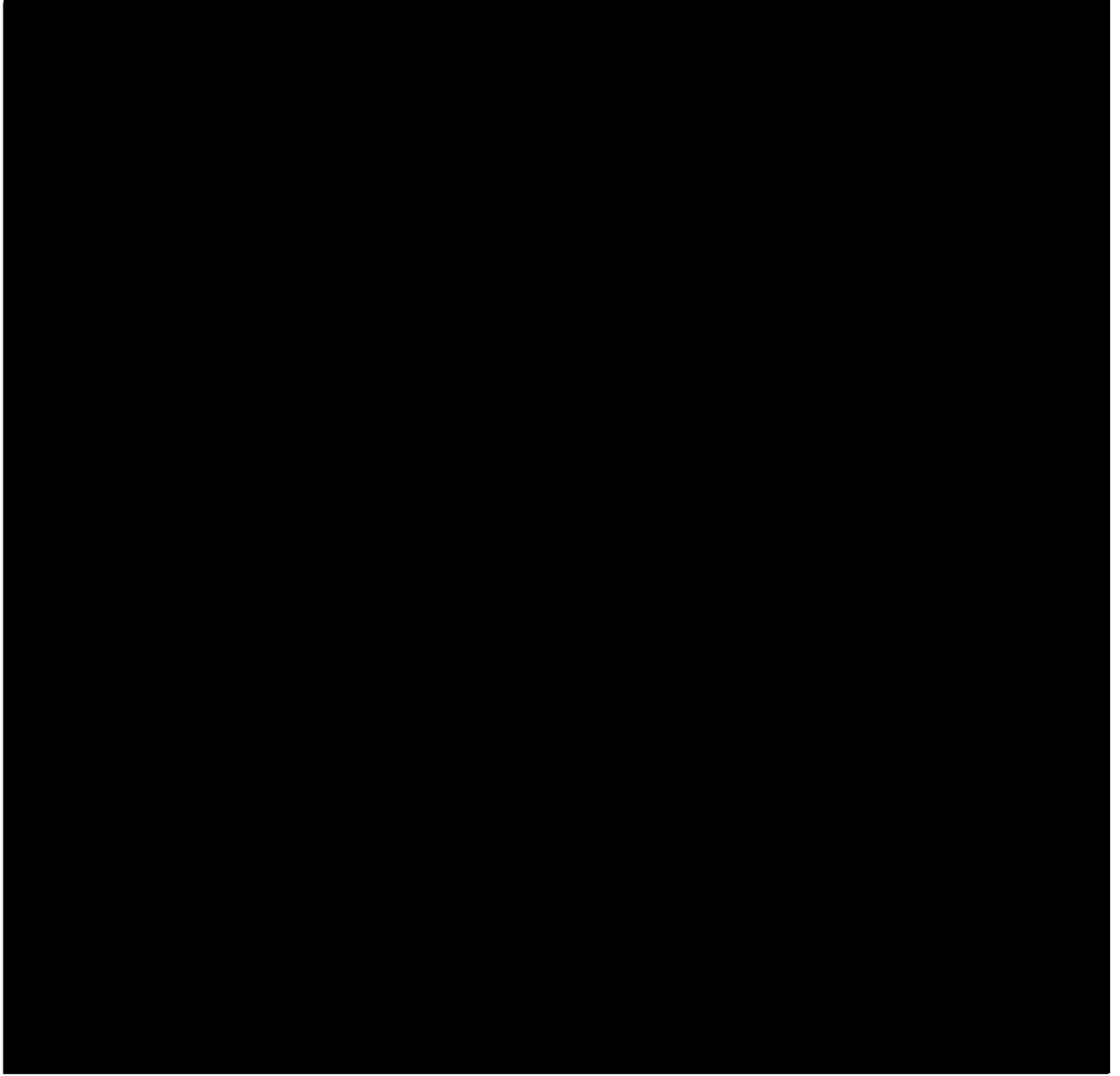
積雪荷重を第 4. 1-3 表に示す。

第4. 1-3表 積雪荷重

積雪深	積雪荷重
150cm	30N/m ² /cm



新 R ① JN 火 G V 00417 C



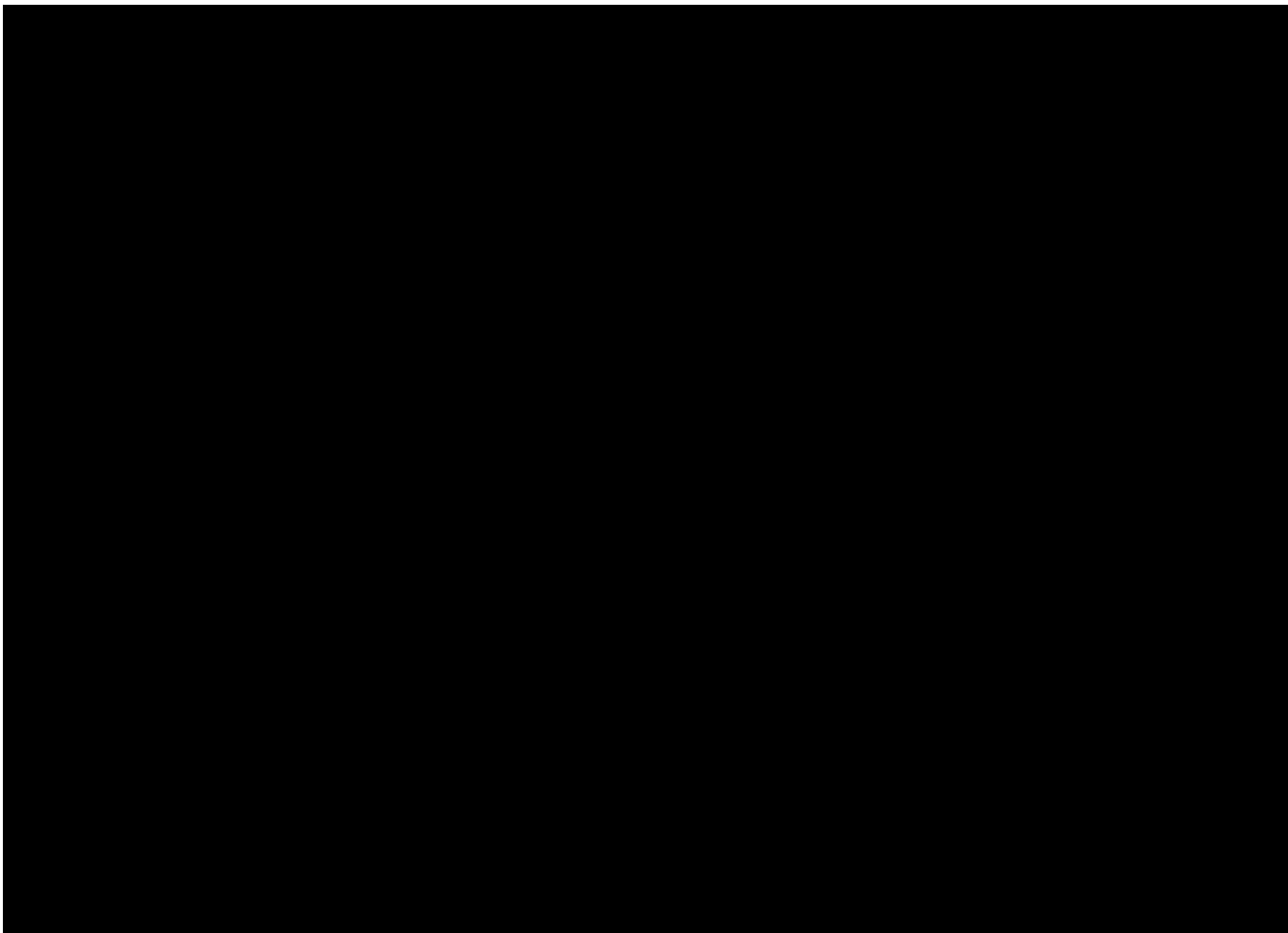
5. 強度評価方法

評価手法は、以下に示す解析法により、適用性に留意の上、規格及び基準類や既文献において適用が妥当とされる手法に基づき実施することを基本とする。

- ・ FEM 等を用いた解析法
- ・ 定式化された評価式を用いた解析法

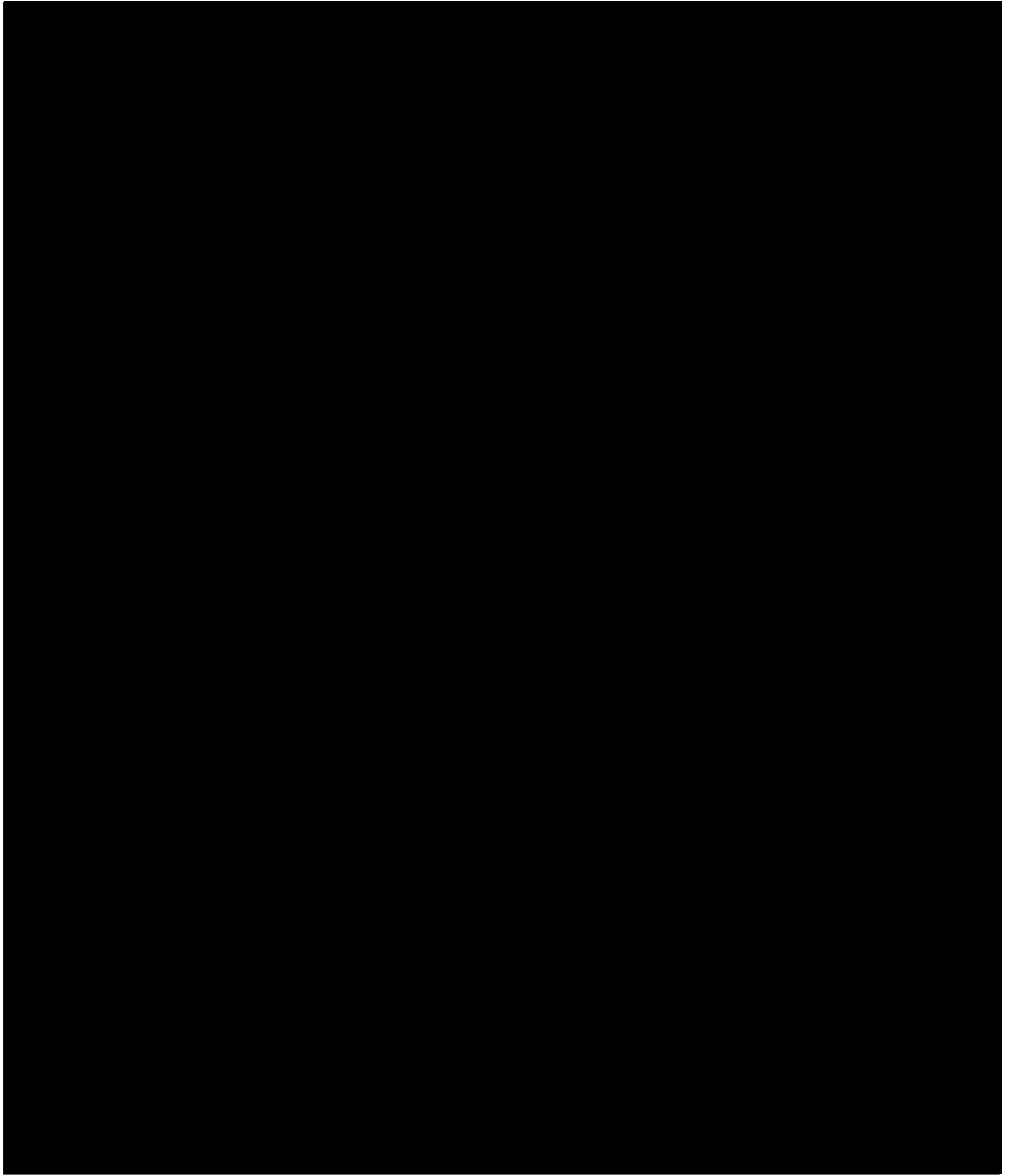
風荷重による影響を考慮する施設については、建築基準法施行令等に基づき風荷重を考慮し、設備の受圧面に対して等分布荷重として扱って良いことから、評価上高さの $1/2$ 又は荷重作用点より高い重心位置に集中荷重として作用するものとしており、これは JEAG4601 耐震評価における 1 質点モデルと等価なものであり、地震荷重を風荷重と置き換え JEAG4601 に基づき評価を行う。

風荷重を考慮した、降下火砕物等堆積による鉛直荷重が作用する場合に強度評価を行う施設のうち、設備の強度評価方法を以下に示す。



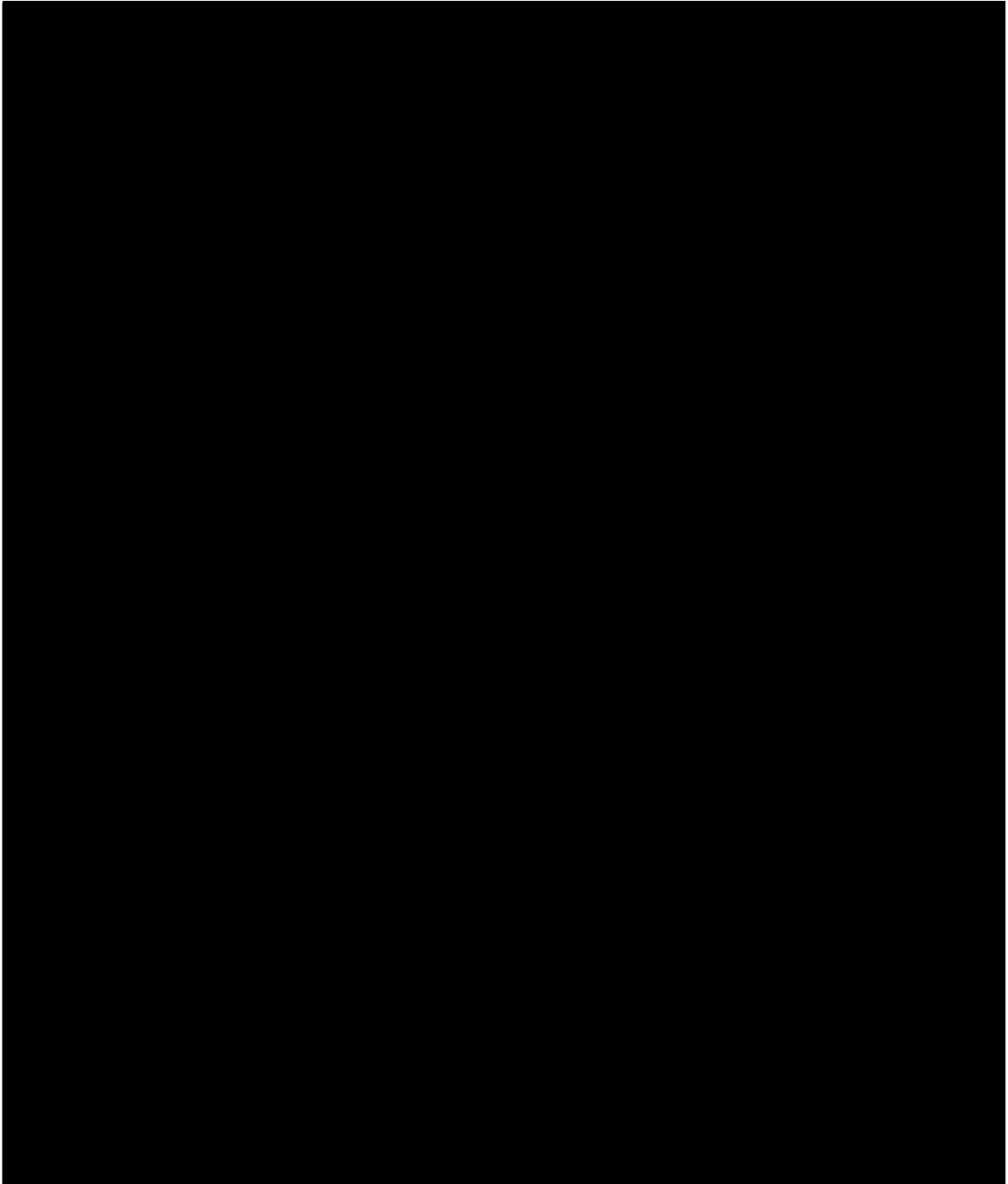


新 R ① JN 火 G V 00419 C





新 R ① JN 火 G V 00420 C



6. 適用規格

評価対象施設の強度評価に用いる規格，基準等を以下に示す。

- (1) 建築基準法及び同施行令
- (2) 鋼構造設計規準—許容応力度設計法— ((社) 日本建築学会, 2005)
- (3) 建築物荷重指針・同解説 ((社) 日本建築学会, (2015))
- (4) 2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書
(監修 国土交通省国土技術政策総合研究所 国立研究開発法人建築研究所, 2015)
- (5) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005/2007 ((社) 日本機械学会)
- (6) 日本産業規格 (JIS)
- (7) 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987 ((社) 日本電気協会)
- (8) 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-2008 ((社) 日本電気協会)

V－別添2－2 火山への配慮が
必要な施設の強度計算書

V－別添 2－2－1 屋外に設置
する降下火碎物防護対象施設に関
する強度計算書

新R ㊦ JN 許 V 00503 B

(2) 冷却塔の強度計算書

(2) - 2 安全冷却水 B 冷却塔
の強度計算書

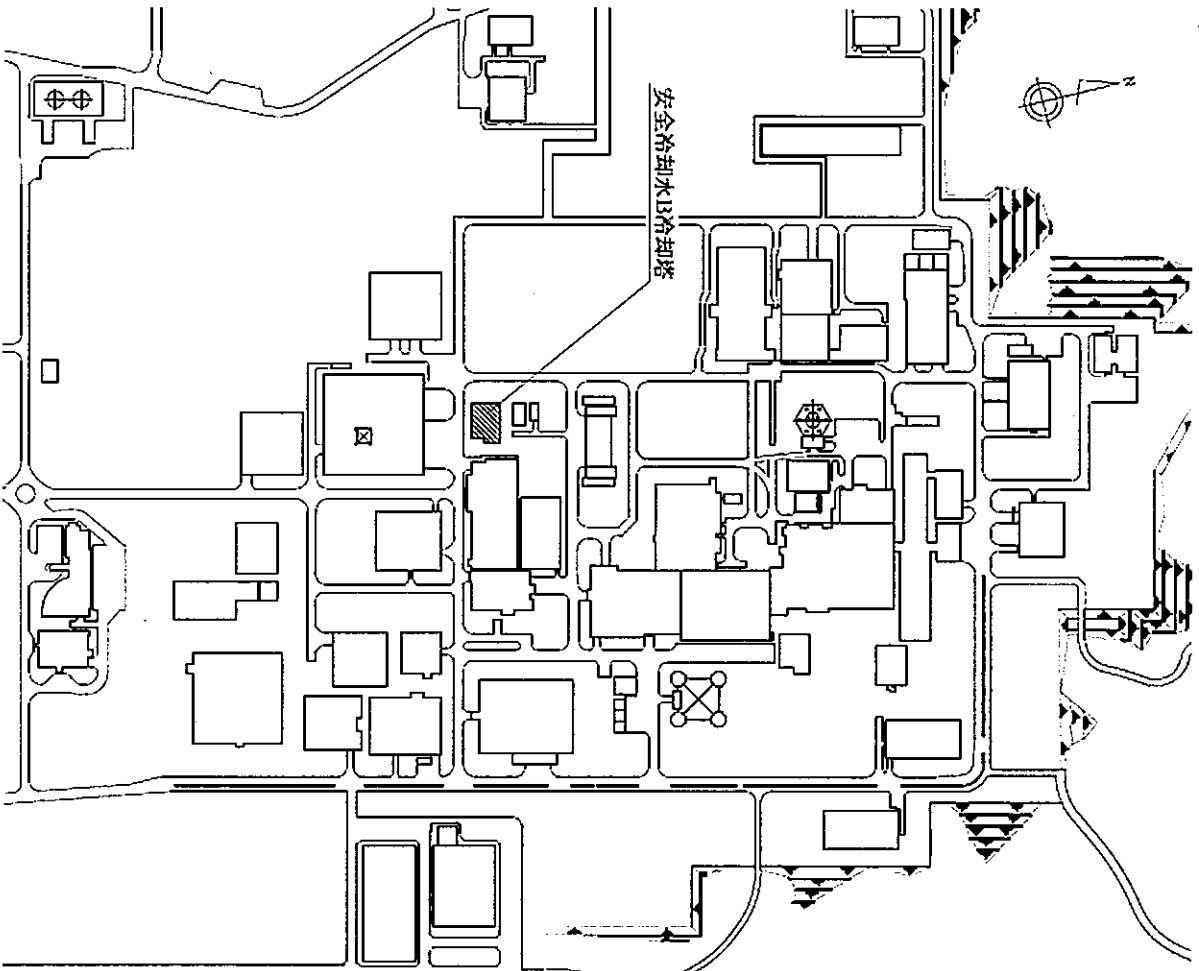
目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
2.1 位置	2
2.2 構造概要	3
2.3 評価方針	5
2.4 適用規格	6
3. 強度評価方法	7
3.1 記号の定義	7
3.2 強度評価の評価対象部位	8
3.3 荷重及び荷重の組合せ	9
3.4 許容限界	12
3.5 評価方法	15
4. 強度評価結果	17

1. 概要

本資料は、添付書類「V-別添2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、評価対象施設である安全冷却水B冷却塔が、設計荷重（火山）に対して、降下火砕物防護対象施設の安全機能を損なわないよう、安全冷却水B冷却塔の主要な構造部材が構造健全性を維持することを確認するものである。

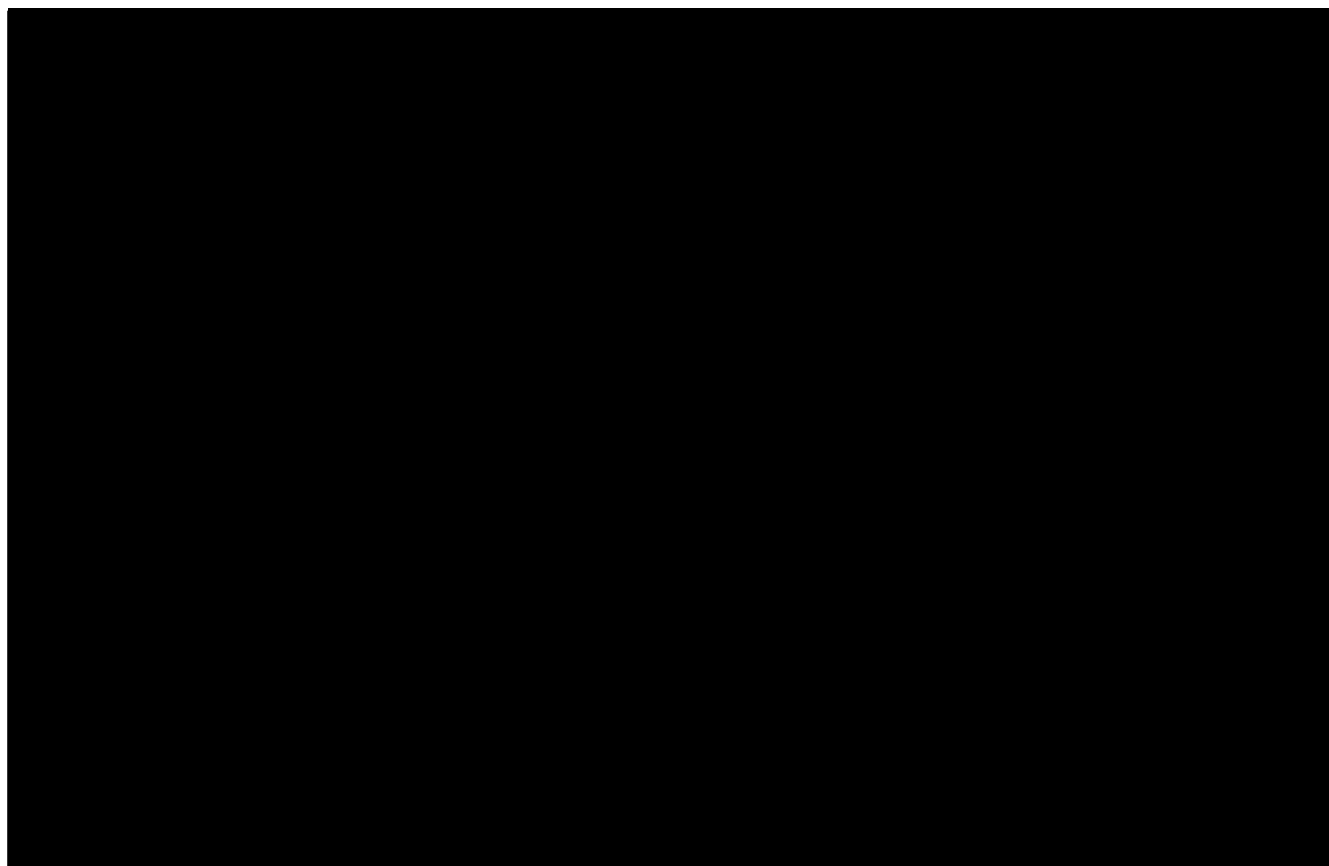
- 2. 基本方針
- 2.1 位置
安全冷却水B冷却塔の配置を第2.1-1図に示す。



第2.1-1図 安全冷却水B冷却塔の配置図

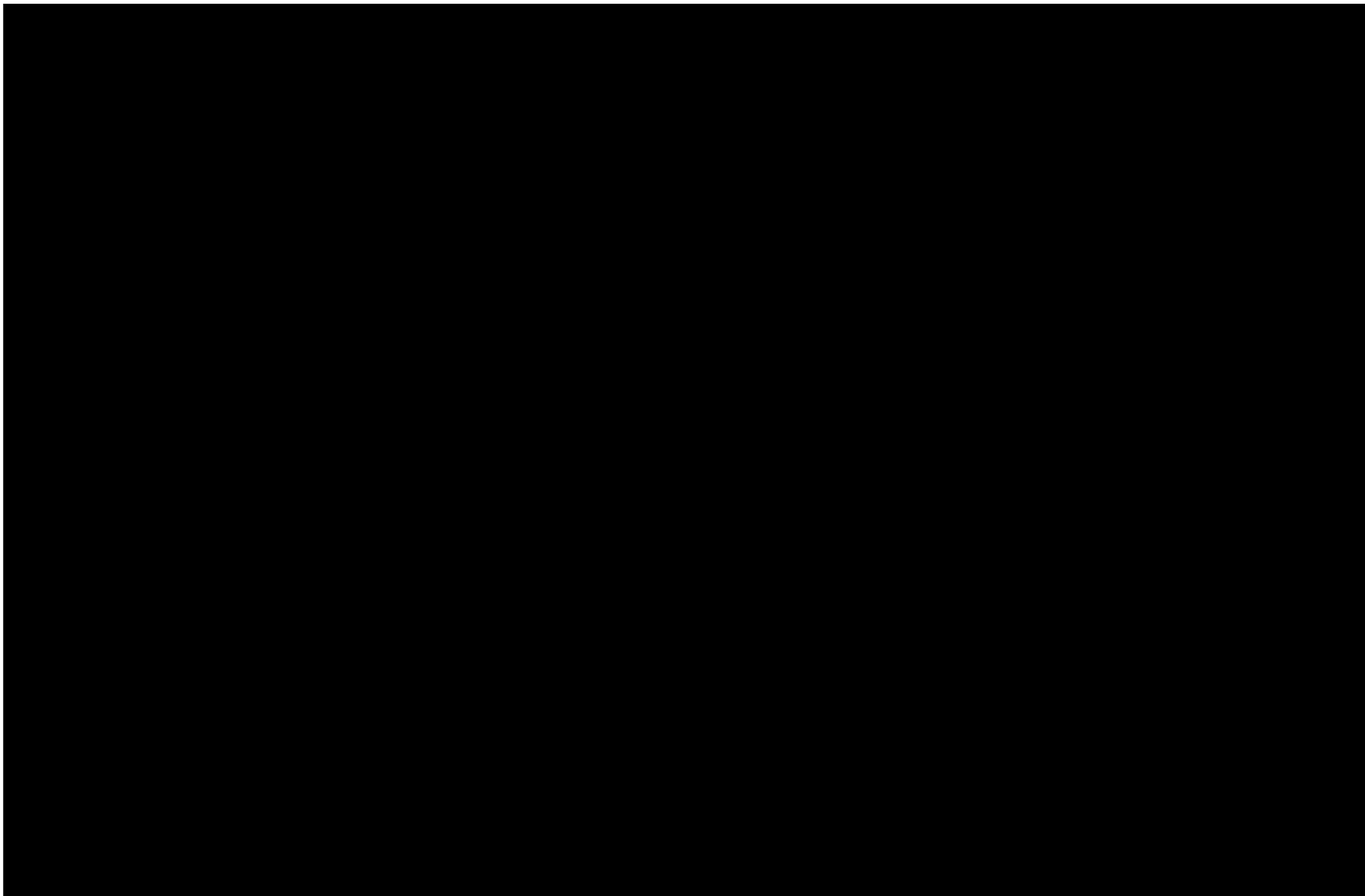


新 R ① JN 安ユ V 00508 F





新R ① JN 安ユ V 00509 B



2.3 評価方針

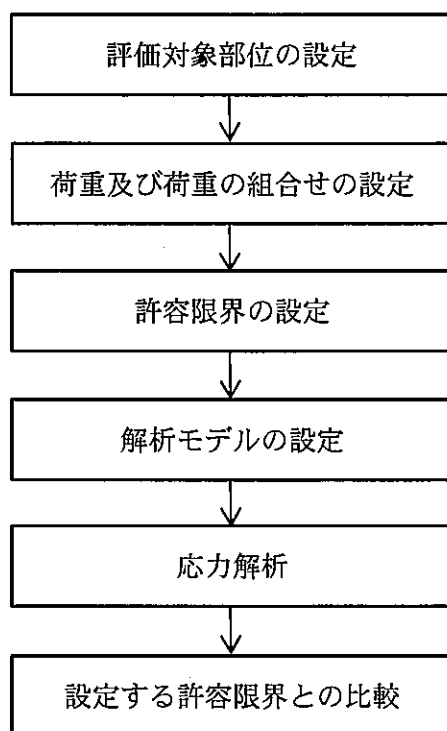
安全冷却水B冷却塔の強度評価は、評価対象部位に発生する応力等が、許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」の条件を用いて計算し、「4. 強度評価結果」にて確認する。

(1) 支持架構及び基礎ボルトの評価方針

支持架構及び基礎ボルトの構造強度評価フローを第2.3-1図に示す。

構造強度評価においては、安全冷却水B冷却塔を構成する管束やファン等を支持する架構が転倒及び倒壊しないことを確認するために、支持架構に対して、設計荷重（火山）を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。各部材の構造強度評価において、その部材に対して応力が大きくなる方向から風が当たることを想定する。各部材の構造強度評価には、3次元はりモデルを用いた弾性応力解析を行う。

支持架構の許容限界は、添付書類「V-別添 2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」に示す許容限界である、JEA4601の許容応力状態IV_ASとする。



第2.3-1図 支持架構及び基礎ボルトの構造強度評価フロー

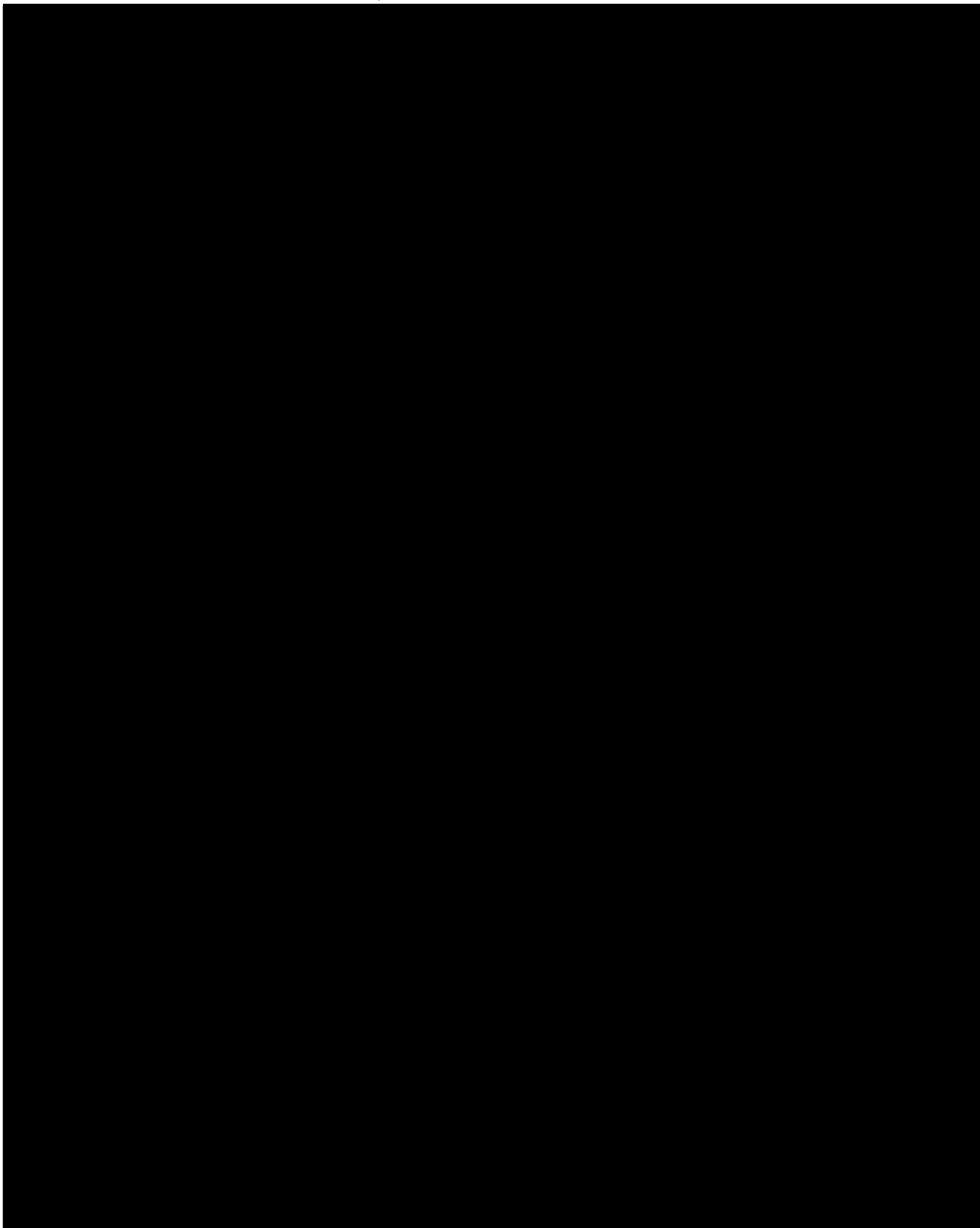
2.4 適用規格

適用する規格，規準等を以下に示す。

- ・ 建築基準法・同施行令・同告示
- ・ 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005/2007 ((社) 日本機械学会)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987 ((社) 日本電気協会)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-2008 ((社) 日本電気協会)
- ・ 2015年版 建築物の構造関係技術基準解説書
(監修 国土交通省国土技術政策総合研究所 国立研究開発法人建築研究所)
- ・ 日本産業規格 (JIS)
- ・ 鋼構造設計基準 一許容応力度設計法一 ((社) 日本建築学会, 2005 改定)

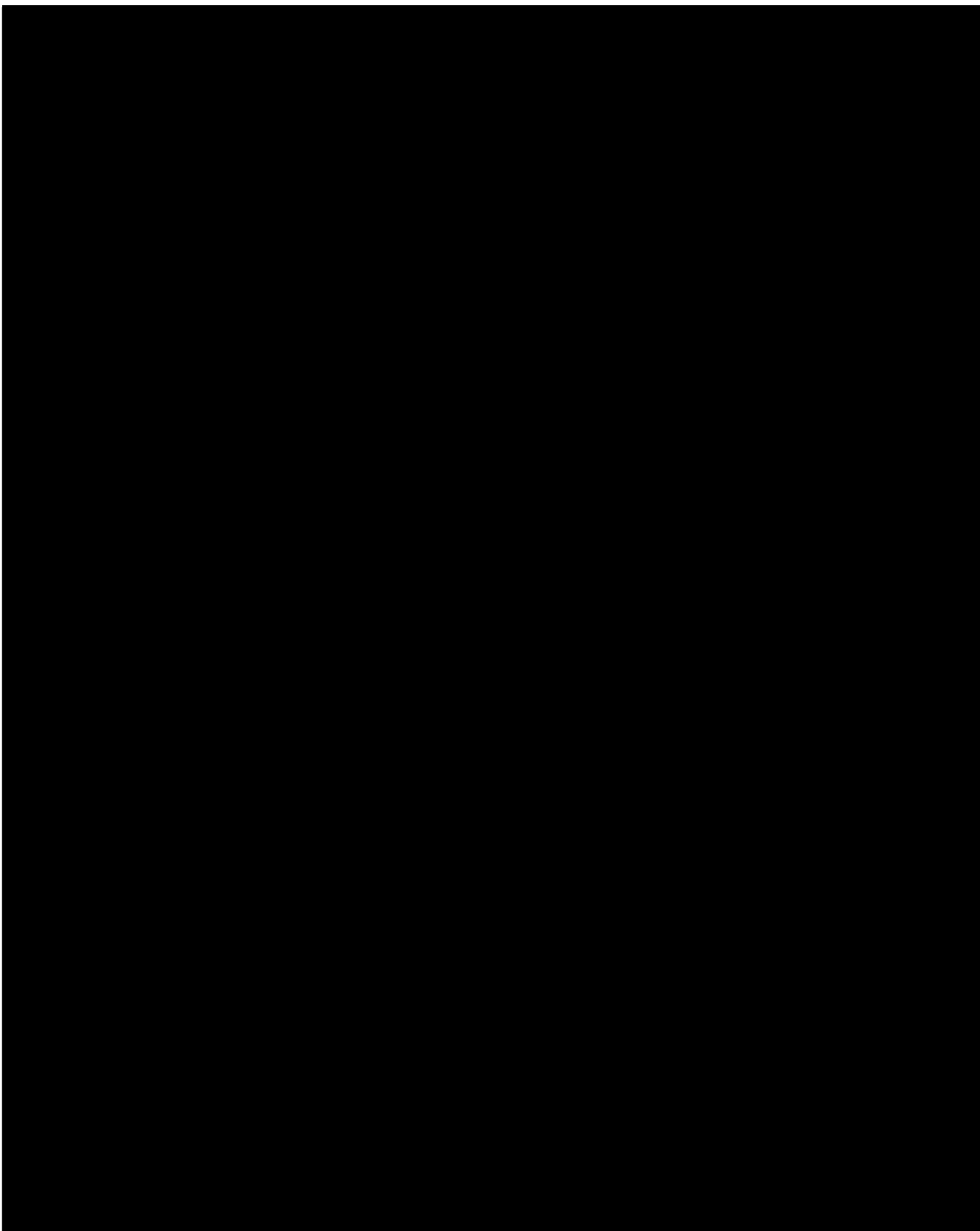


新 R ① JN 安工 V 00512 E





新 R ① JN 安ゴ V 00513 F



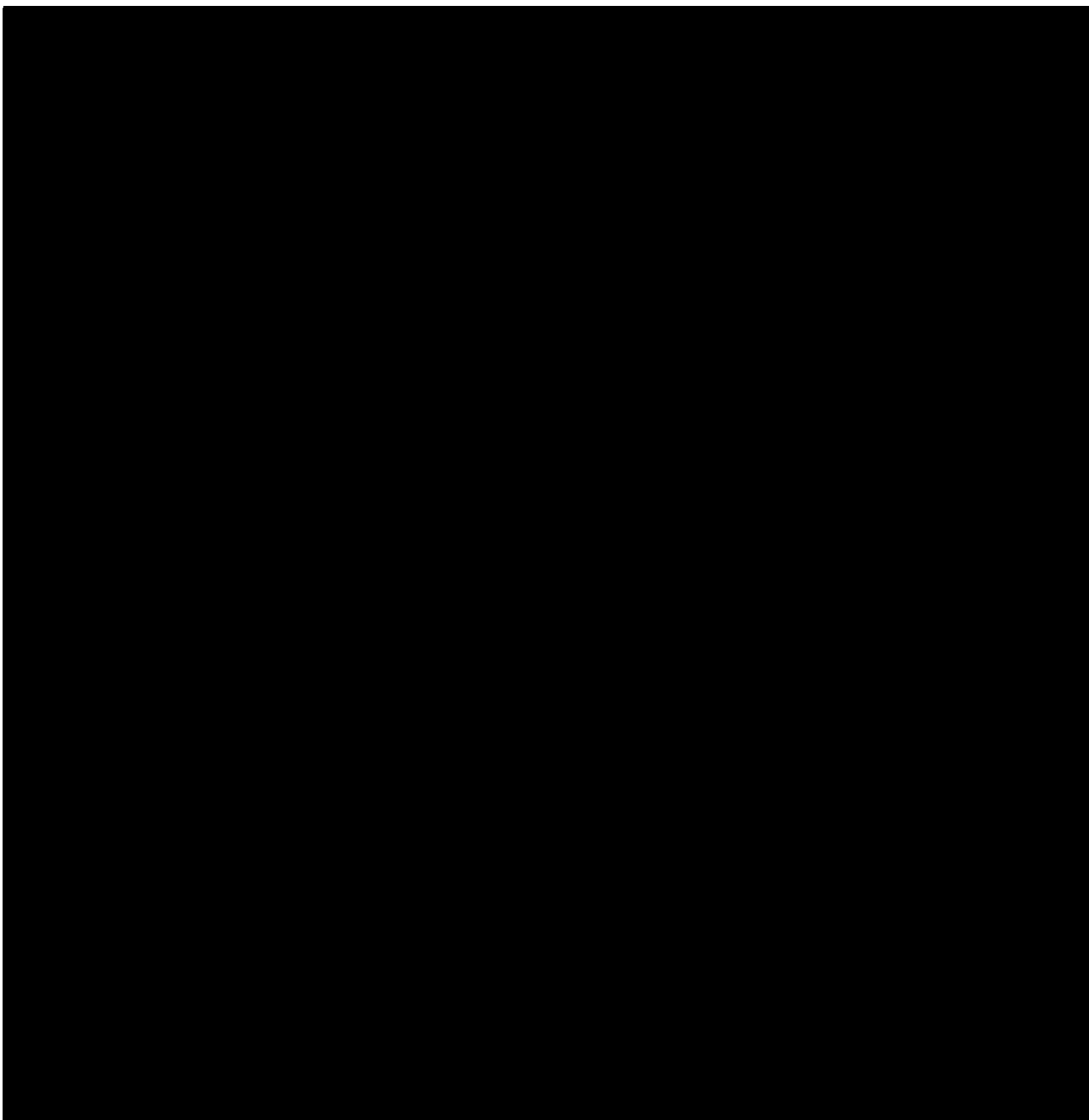


新 R ① JN 安ユ V 00514 F



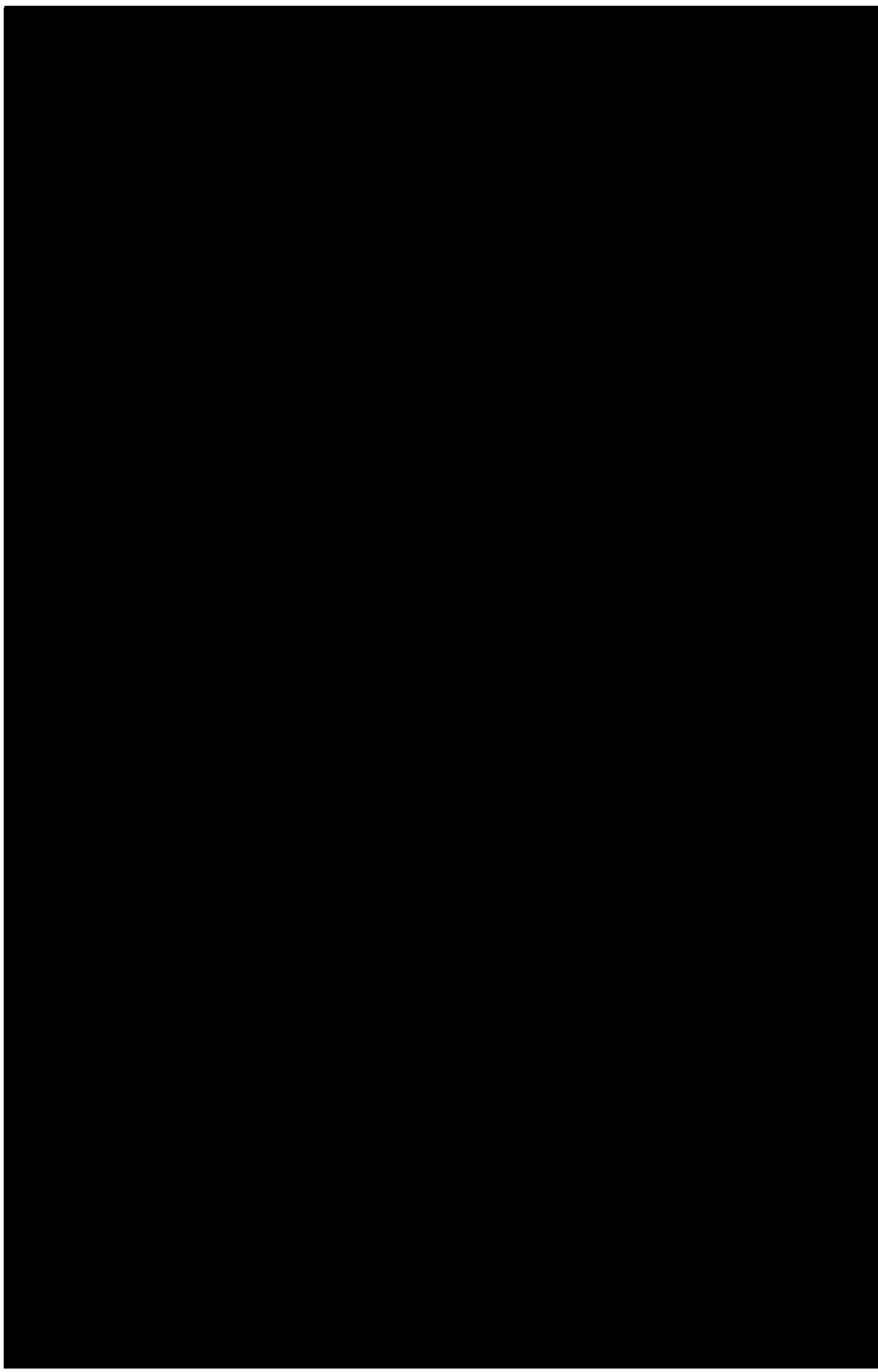


新R① JN 安工 V 00515 D



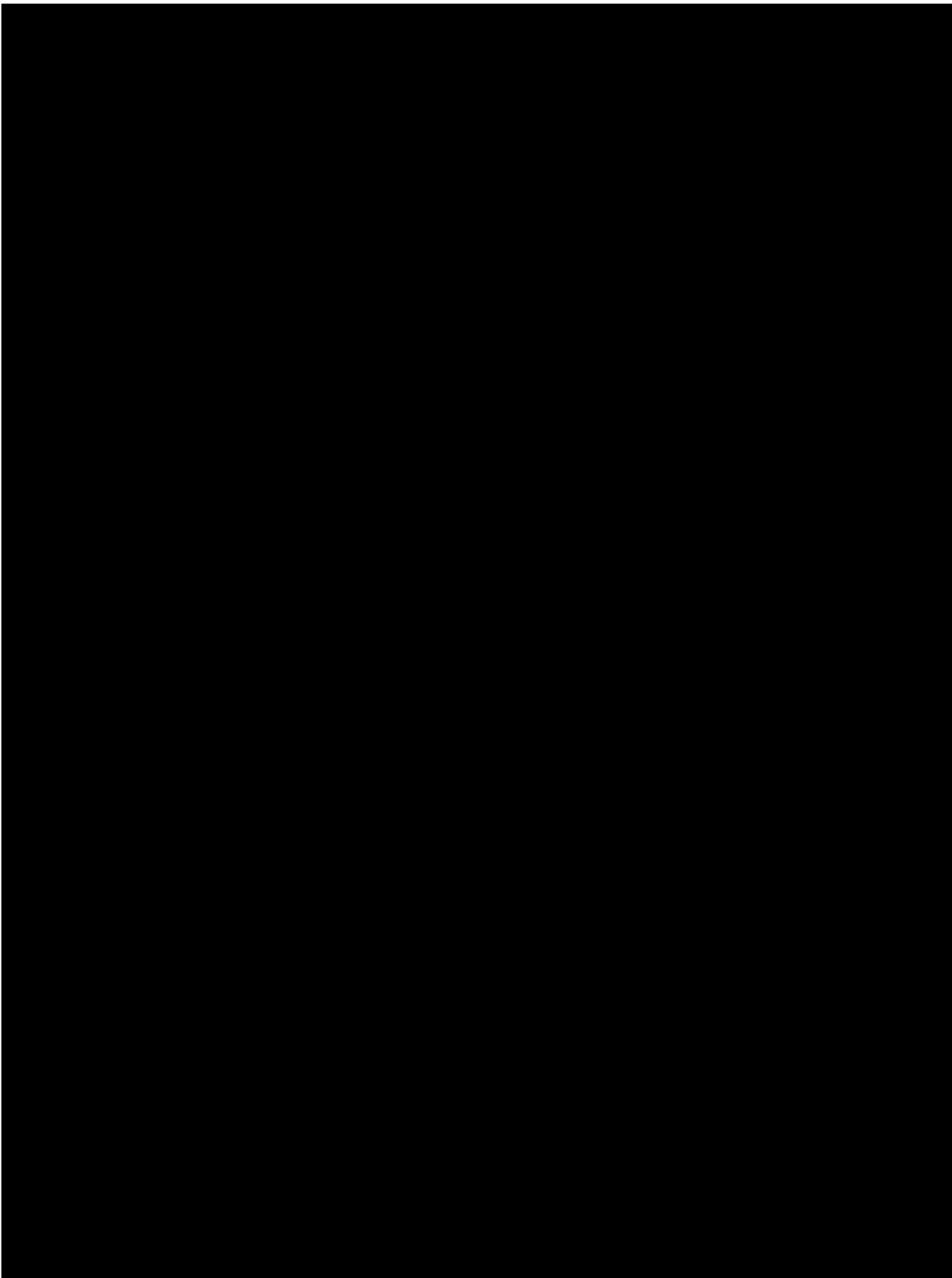


新R① JN 安ユ V 00516 B



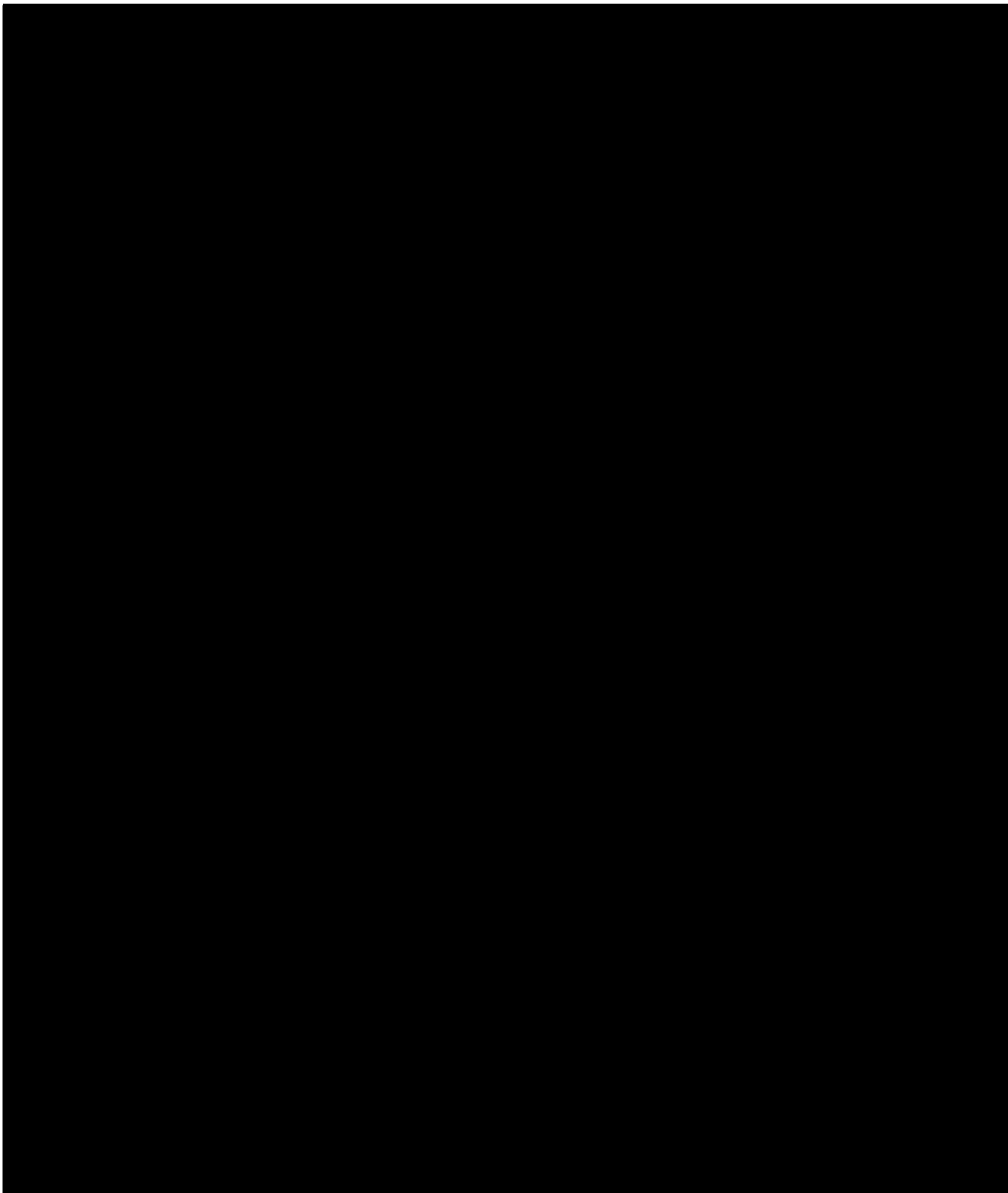


新 R ① JN 安ユ V 00517 C



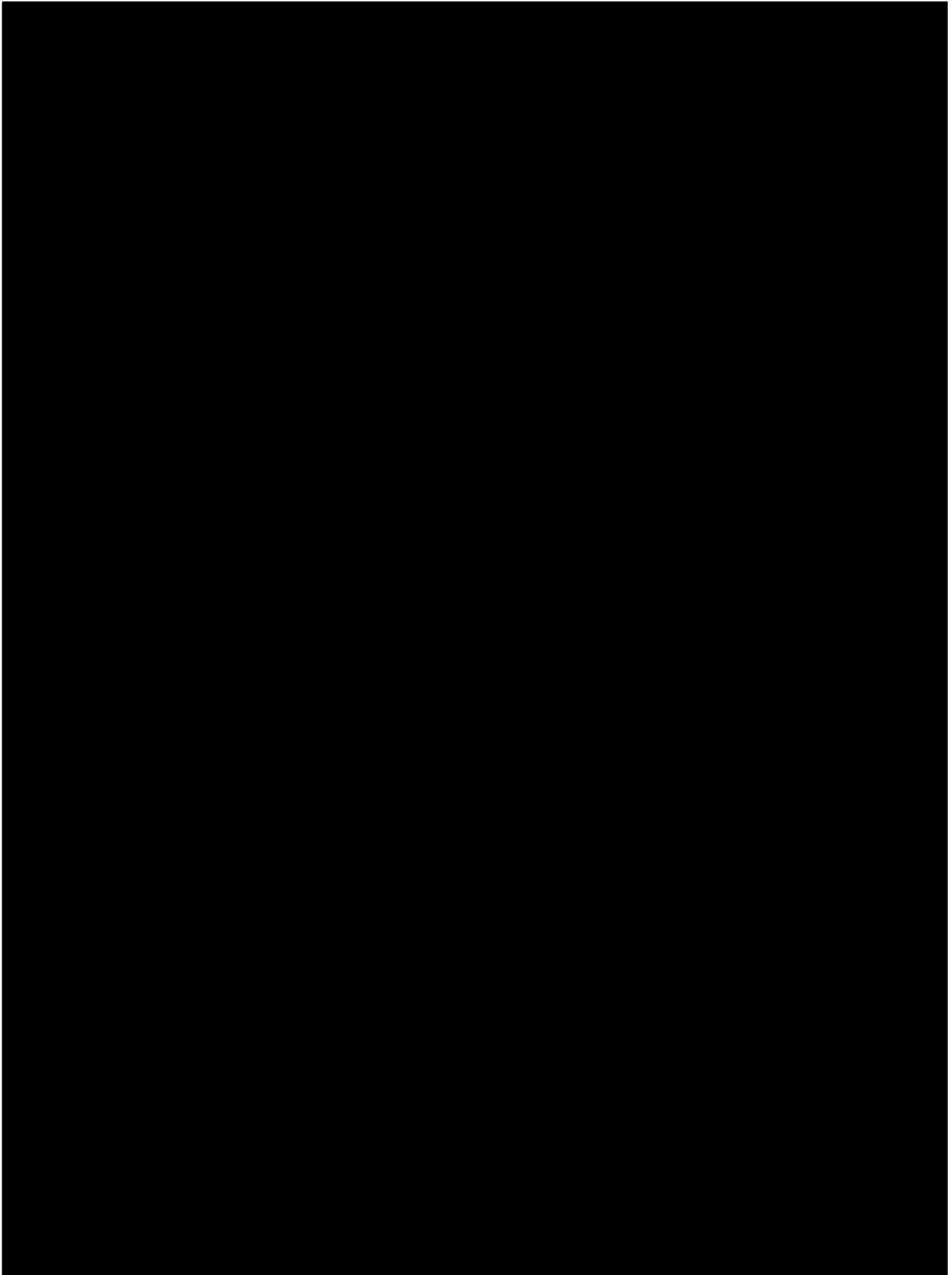


新 R ① JN 安工 V 00518 F



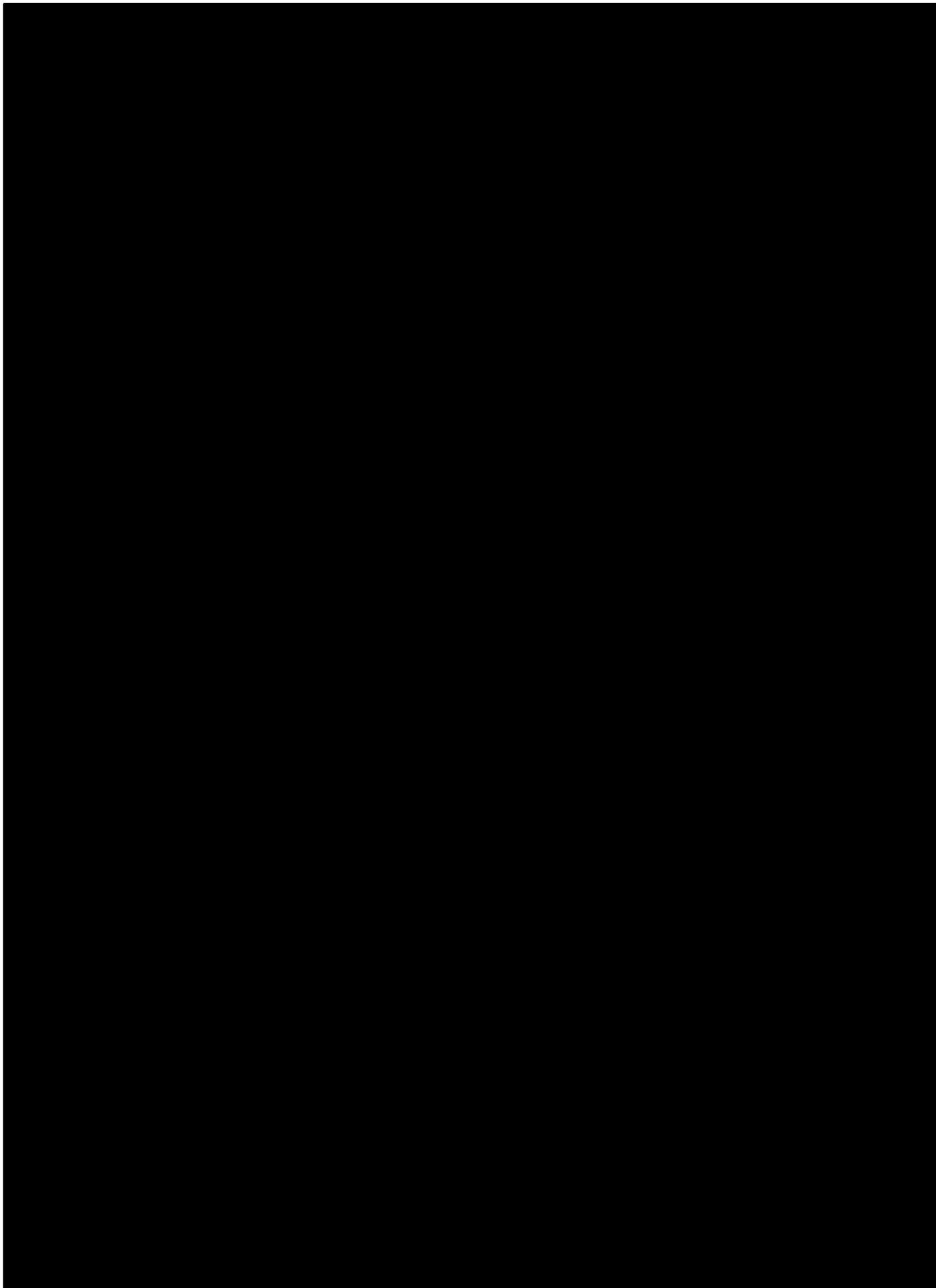


新 R ① JN 安ゴ V 00519 D



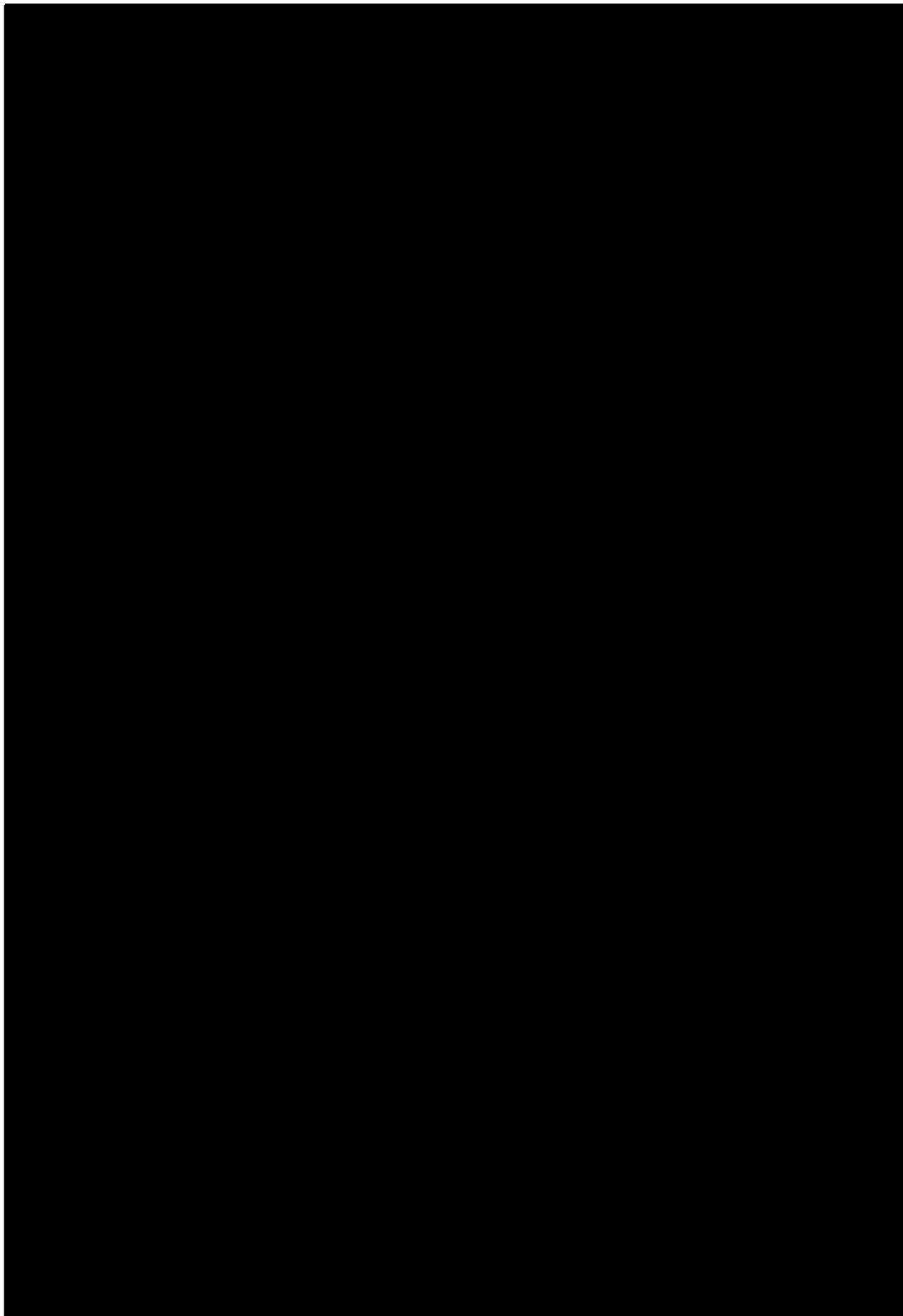


新 R ① JN 安ユ V 00520 E



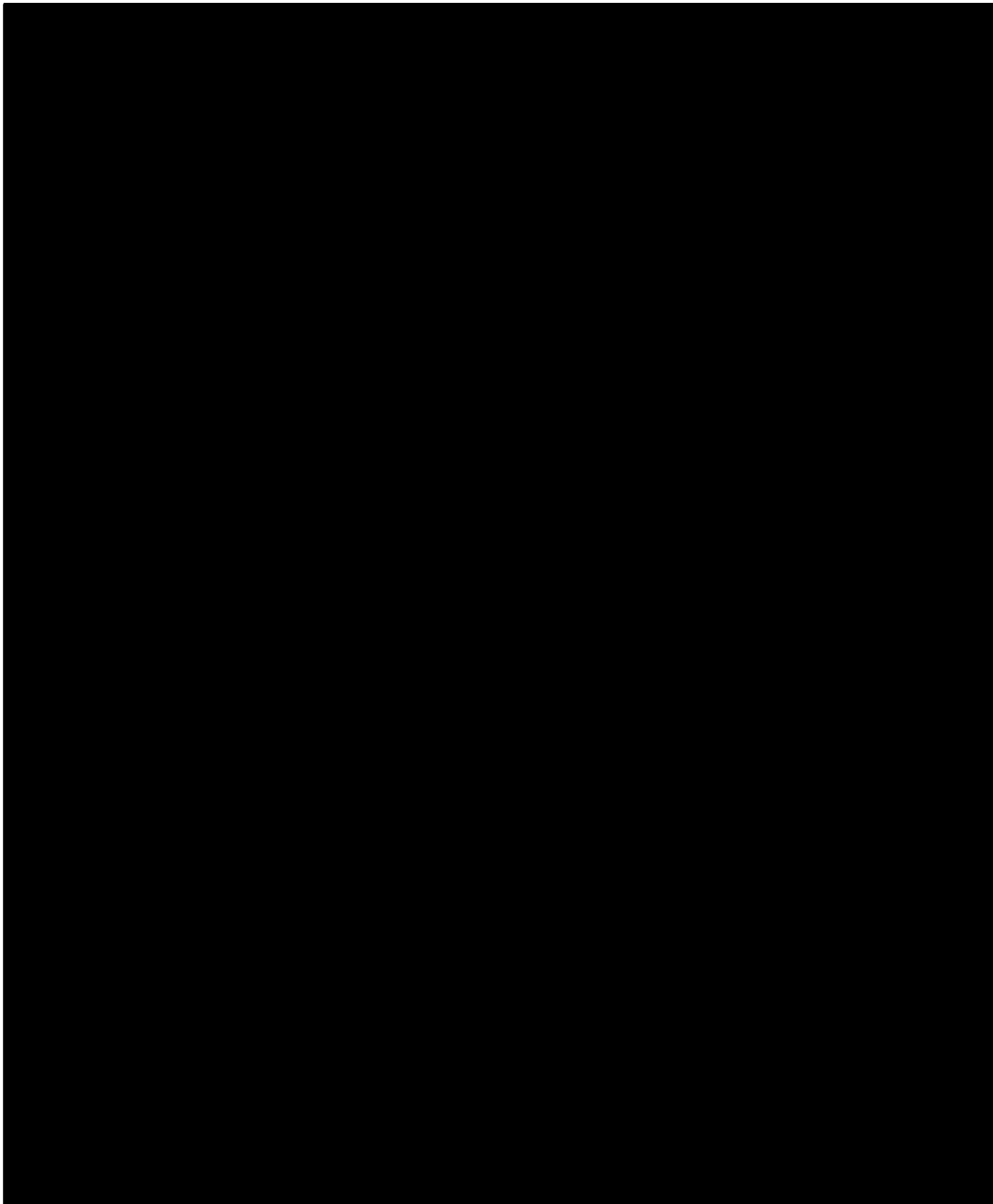


新 R ① JN 安ユ V 00521 C



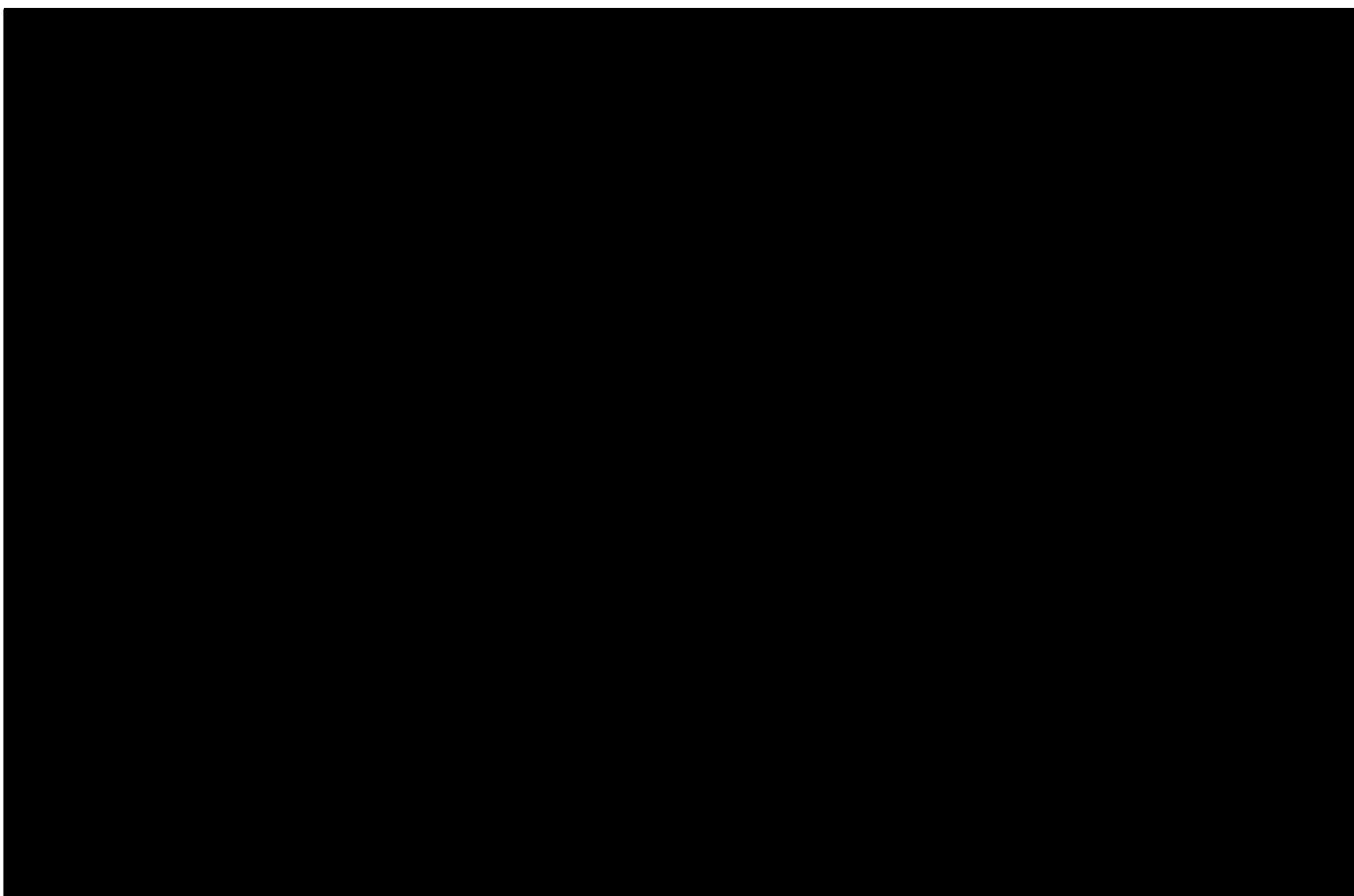


新 R ① JN 安ユ V 00522 C





新 R ① JN 安ユ V 00523 B





V-別添-2-2-3

竜巻防護対策設備に関する

評価条件及び評価結果

新R①JN許V00601B





(1)

安全冷却水 B 冷却塔

飛来物防護ネットの強度計算書

新 R ① JN 許 V 00602 B



目次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
2.1 位置	2
2.2 構造概要	3
2.3 評価方針	6
2.4 適用規格	8
3. 強度評価方法	9
3.1 記号の定義	9
3.2 評価対象部位	11
3.3 荷重及び荷重の組合せ	12
3.4 許容限界	14
3.5 評価方法	15
4. 強度評価結果	18

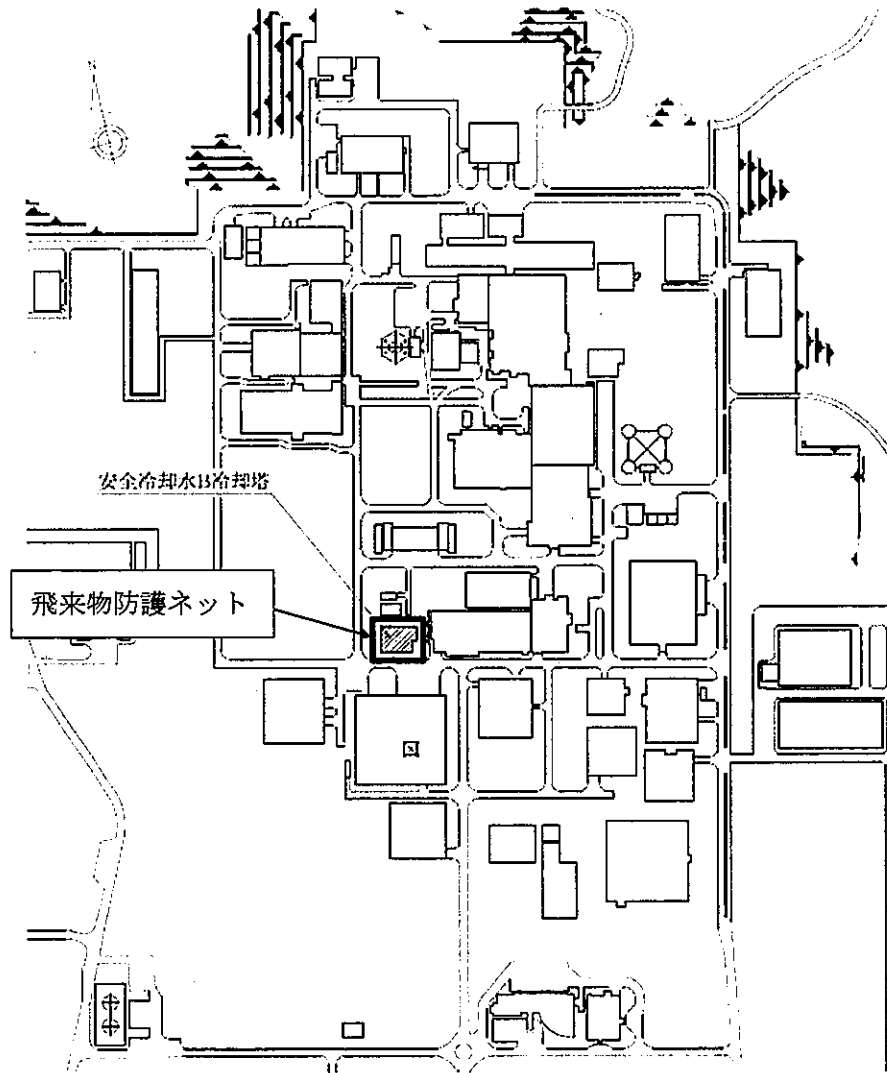
1. 概要

本資料は、添付書類「V-別添2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、屋外の降下火砕物防護対策施設である安全冷却水B冷却塔飛来物防護ネット（以下、「飛来物防護ネット」という。）が降下火砕物等堆積時においても、安全冷却水B冷却塔に対して波及的影響を与えないよう、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

2.1 位置

飛来物防護ネットの配置を第2.1-1図に示す。



第2.1-1図 飛来物防護ネットの配置図

2.2 構造概要

飛来物防護ネットの構造は、添付書類「V-別添1-1 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」にて設定している構造計画を踏まえ、構造を設定する。

飛来物防護ネットは、竜巻防護対象施設を竜巻による飛来物から防護するために防護ネット、防護板で覆うものであり、防護ネット、防護板とそれを支える支持架構によって構成される。

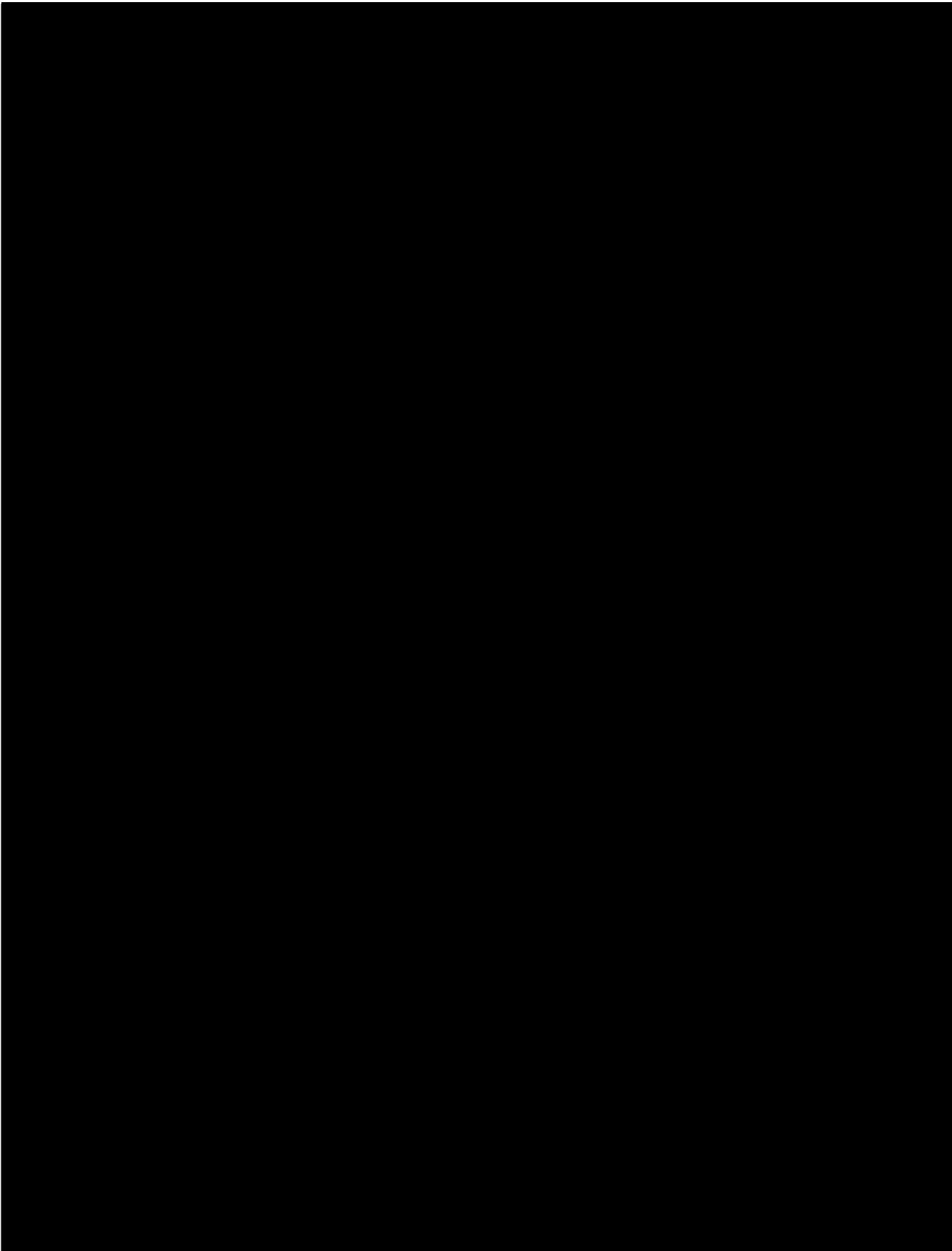
支持架構は、柱、梁及びブレースによって構成されるラーメン・トラス構造であり、溶接及びボルトにより接合される鉄骨構造物である。

また、飛来物防護ネットは杭基礎を介して支持地盤である鷹架層に支持される。

飛来物防護ネットの全景を第2.2-1図、同平面図・側面図を第2.2-2図に示す。

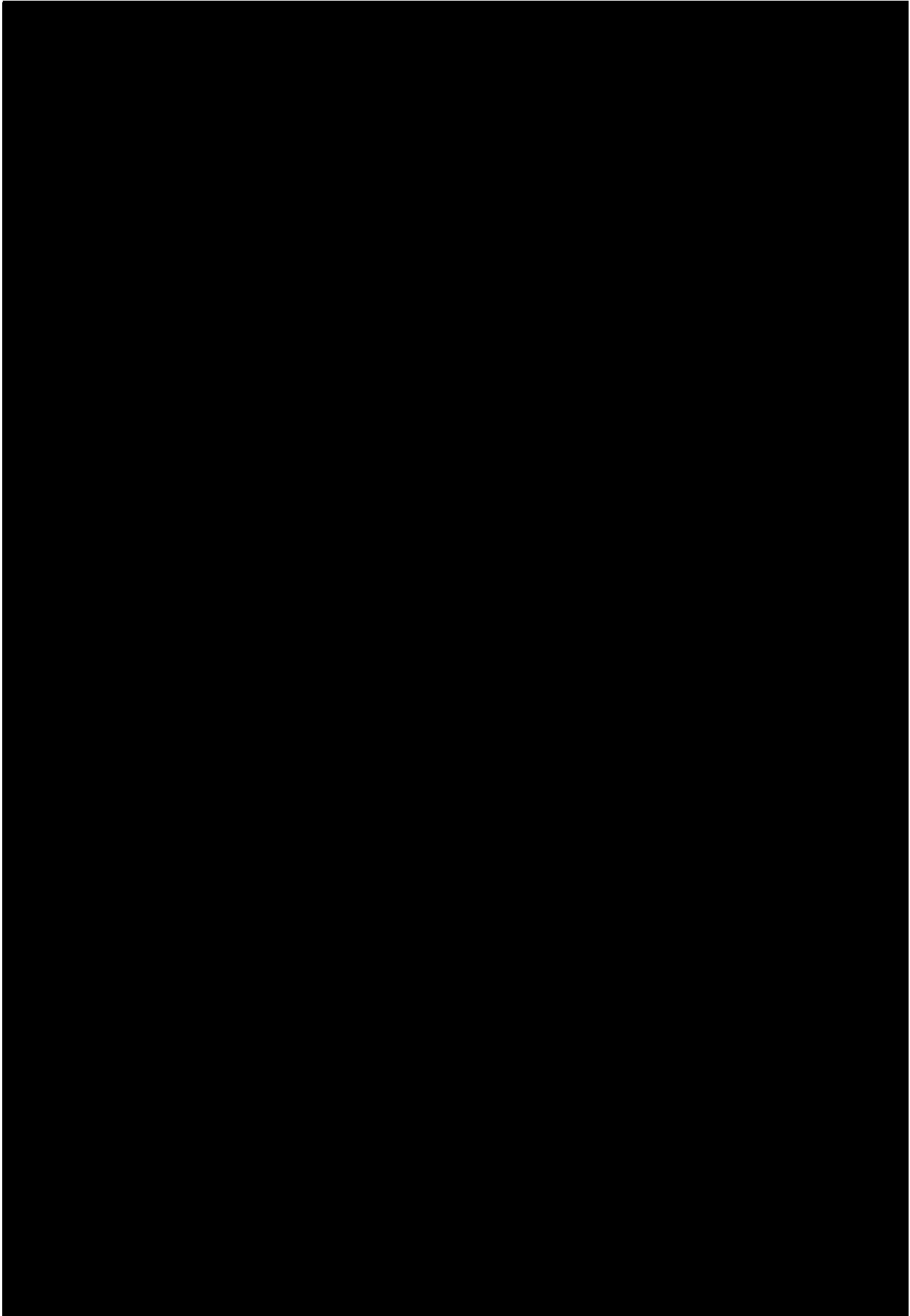


新 R ① JN 安ユ V 00607 A





新 R ① JN 安ユ V 00608 A



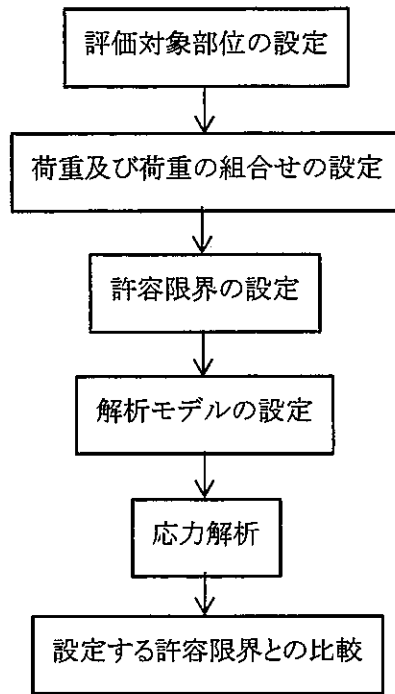
2.3 評価方針

飛来物防護ネットの強度評価は、添付書類「V-別添2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえ、支持架構の評価対象部位に作用する応力が、許容限界内に収まることを「3.5 評価方法」に示す方法により、「3.3 荷重及び荷重の組合せ」に示す評価条件を用いて計算し、「4. 強度評価結果」にて確認する。

飛来物防護ネットの評価フローを第2.3-1図に示す。

強度評価は、その構造を踏まえ、設計荷重（火山）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。

支持架構の強度評価においては、三次元梁モデルによる応力解析を行い、各部材要素に生ずる応力を算出する。それぞれの評価については、「鋼構造設計規準」（2005改定）（日本建築学会）に示す評価式を用いる。飛来物防護ネットの許容限界は、添付書類「V-別添2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に従い、安全上適切と認められる規格及び基準又は試験等で妥当性が確認されている値を用いる。



第2.3-1図 飛来物防護ネットの評価フロー



2.4 適用規格

適用する規格，基準，指針等を以下に示す。

- ・ 鋼構造設計規準 -許容応力度設計法- ((社)日本建築学会, 2005)
- ・ 建築物荷重指針・同解説 ((社)日本建築学会, 2015)
- ・ 2015年版 建築物の構造関係技術基準解説書
(監修 国土交通省国土技術政策総合研究所 国立研究開発法人建築研究所, 2015)

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

飛来物防護ネットの強度評価に用いる記号を第3.1-1表に示す。

新 R ① JN 安ユ V 00612 A

第3.1-1表 強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A	m ²	受風面積
C _f	—	風力係数
E	—	建築基準法施行令第87条第2項に規定する数値
E _r	—	建設省告示第1454号第2項の規定によって算出した平均風速の高さ方向の分布を表わす係数
f _b	MPa	曲げに対する許容限界
f _{bx}	MPa	X軸廻り曲げに対する短期許容応力度
f _{by}	MPa	Y軸廻り曲げに対する短期許容応力度
f _c	MPa	圧縮に対する短期許容応力度
f _s	MPa	せん断に対する短期許容応力度
f _t	MPa	引張に対する短期許容応力度
G _r	—	ガスト影響係数
H	m	建築物の高さと軒の高さとの平均
L _s	kN	積雪荷重
q	N/m ²	設計用速度圧
V ₀	m/s	基準風速
W _v	kN	降下火砕物の堆積による荷重
W _w	kN	風荷重
Z _b	m	地表面粗度区分に応じて建設省告示第1454号に掲げる数値
Z _G	m	地表面粗度区分に応じて建設省告示第1454号に掲げる数値
α	—	地表面粗度区分に応じて建設省告示第1454号に掲げる数値
σ _b	MPa	部材の曲げ応力度
σ _{bx}	MPa	部材のX軸廻り曲げ応力度
σ _{by}	MPa	部材のY軸廻り曲げ応力度
σ _c	MPa	部材の圧縮軸応力度
σ _t	MPa	部材の引張軸応力度
τ _s	MPa	部材のせん断応力度
σ _c , σ _t	N/m	部材の圧縮と引張の軸応力度

3.2 評価対象部位

飛来物防護ネットの評価対象部位は、添付書類「V-別添2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」にて示している評価対象部位に従って、支持架構の主要部材とする。

評価対象部位は、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

降下火砕物の堆積による荷重は、降下火砕物等が堆積する支持架構の天面部材に作用し、柱を介して基礎盤へ伝達される。また、風圧力による荷重は支持架構側面の部材に作用し、柱を介して基礎盤に伝達される。

このことから、以下の部位を構造強度評価の評価対象部位として選定する。

- ・柱
- ・大梁
- ・小梁
- ・トラス柱
- ・鉛直ブレース
- ・水平ブレース

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、添付書類「V-別添2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重の組合せと許容限界」に示している、荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 荷重の設定

飛来物防護ネットの強度評価に用いる荷重を以下に示す。

a. 常時作用する荷重 (D)

常時作用する荷重は、支持架構、防護ネット、防護板等の自重及び積載荷重とする。

b. 降下火砕物の堆積による荷重 (W_v)

降下火砕物の堆積による荷重を第3.3-1表に示す。

第3.3-1表 降下火砕物の堆積による荷重

対象	降下火砕物の堆積による荷重 (W_v)
飛来物防護ネット	7150 N/m ²

c. 積雪荷重 (L_s)

積雪荷重を第3.3-2表に示す。

第3.3-2表 積雪荷重

対象	積雪荷重 (L_s)
飛来物防護ネット	4500 N/m ²

d. 風荷重 (W_w)

風圧力による荷重は、建築基準法施行令第87条及び平成12年建設省告示第1454号に従い、地表面粗度区分Ⅱ、地方の区分に応じて定められた風速34m/s及び建屋形状を考慮して算出した風力係数Cを用いて算出する。

飛来物防護ネットは、高さが5m以上であることから、Hが Z_b 以上の場合の式を用いる。

風力係数Cの値を第3.3-3表に示す。

$$W=q \cdot C \cdot A$$

ここで、

$$q=0.6 \cdot E' \cdot V_0^2$$

$$E' = E_r^2 \cdot G_f$$

$$E_r=1.7 \cdot (H/Z_G)^{\alpha}$$

第3.3-3表 風力係数C

	ネット面	柱・梁面	壁面	
			風上壁面	風下壁面
風力係数C	1.4kz ^{※1}	2.1	0.8kz ^{※1}	-0.4

※1kzは一律1.0とする。

2015年版 建築物の構造関係技術基準解説書より

(2) 荷重の組合せ

評価において考慮する荷重の組合せは、飛来物防護ネットの評価対象部位ごとに設定する。

評価において考慮する荷重の組合せを、第3.3-4表に示す。

第3.3-4表 評価において考慮する荷重の組合せ

設備名称	評価対象部位	荷重の組合せ
飛来物防護ネット	支持架構	①常時作用する荷重 ②降下火砕物の堆積による荷重 ③積雪荷重 ④風荷重

3.4 許容限界

許容限界は、添付書類「V-別添 2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重の組合せと許容限界」にて設定している許容限界に従って、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮して設定する。

支持架構は、構造強度設計上の性能目標として、複数回堆積することを想定する降下火砕物の堆積による荷重並びに積雪及び風（台風）を考慮した荷重に対し、降下火砕物堆積時の機能維持を考慮し、構造健全性を維持する設計とする。

降下火砕物の堆積による荷重は一時的なものであることから、本評価における許容限界は短期荷重として扱う。支持架構の短期許容応力度は、「鋼構造設計規準」(2005改定) (日本建築学会) に基づくものとし、応力度比は1.0以下とする。

使用材料の許容限界を第3.4.-1表に示す。

第3.4.-1表 使用材料の許容限界

使用材料	基準強度 (MPa)	許容限界
SN490B	325	短期許容応力度を1.1倍した値を許容限界として設定
BCP325		
G385	385	

3.5 評価方法

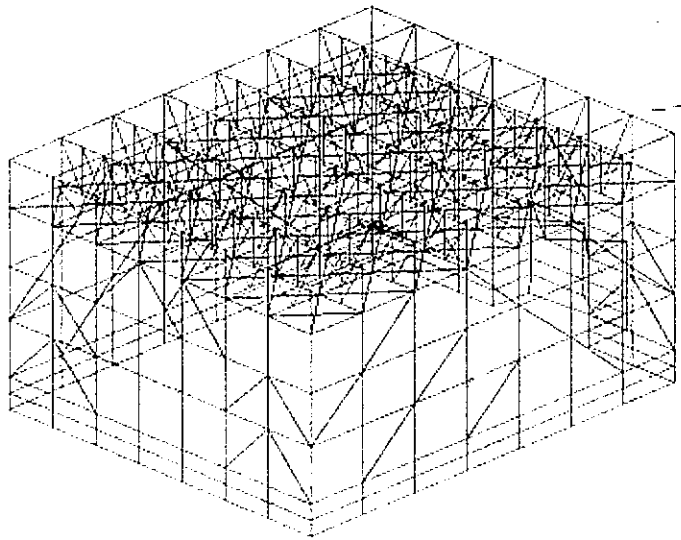
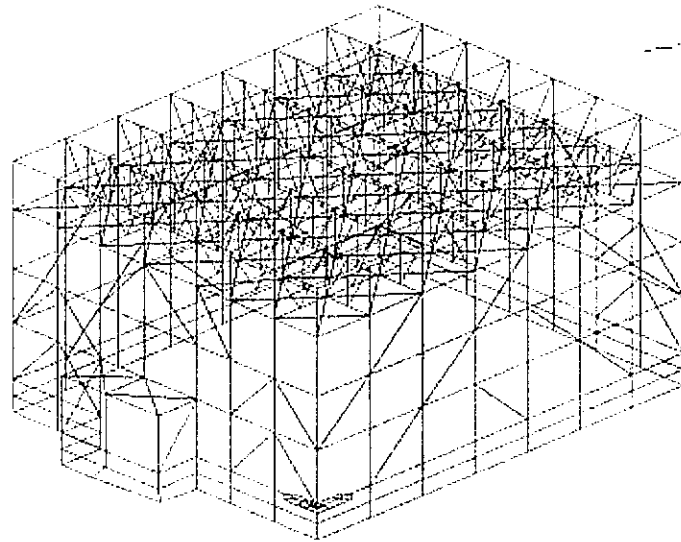
飛来物防護ネットの評価は、支持架構の評価モデルを用いて、常時作用する荷重、降下火砕物の堆積による荷重、積雪荷重及び風荷重を付与した場合の応力を評価し、許容応力度を超えないことを確認する。また、応力の組合せが考えられる場合には、組合せ応力に対しても評価を行う。

(1) 計算モデル

計算においては、支持架構全体を三次元フレームモデルによりモデル化し、解析コード「midas iGen (ver.845 R2)」を用いて評価を実施する。

飛来物防護ネットの評価モデル図を第3.5-1図に示す。

なお、評価に用いる解析コード「midas iGen (ver.845 R2)」の検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「V-4 計算機プログラム(解析コード)の概要」に示す。



第3.5-1図 飛来物防護ネットの評価モデル図

(2) 計算式

a. 軸力及び曲げモーメントに対する評価方法

軸力及び曲げモーメントが生じる部材は、座屈を考慮し、部材に生じる軸応力度及び曲げ応力度の組合せ応力が、許容限界を超えないことを確認する。

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1.0 \text{ または } \frac{\sigma_t}{f_t} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1.0$$

b. せん断力に対する評価方法

せん断力が生じる部材は、部材に生じるせん断応力度が、下式により許容限界を超えないことを確認する。

$$\frac{\tau_s}{f_s} \leq 1.0$$

4. 強度評価結果

飛来物防護ネットの強度評価結果を第4.-1表に示す。

強度評価結果は許容限界を超えないことから、十分な構造強度を有している。

新 R ① JN 安ユ V 00621 B

第4.-1表 飛来物防護ネットの強度評価結果(柱・大梁) (1/3)

対象	部材	応力度	発生応力度 (MPa)	許容応力度 (MPa)	応力度比	
飛来物防護ネット	支持架構	柱	引張	$\sigma_t = -$	$f_t = 325$	-
			圧縮	$\sigma_c = 37.3$	$f_c = 181$	0.21
			曲げ	$\sigma_{bx} = 1.0$	$f_{bx} = 325$	0.01
				$\sigma_{by} = 92.6$	$f_{by} = 325$	0.29
			せん断	$\tau_s = 7.5$	$f_s = 187$	0.04
			組合せ(引張+曲げ)	(応力度比) -	(許容値) 1.00	-
			組合せ(圧縮+曲げ)	(応力度比) 0.50	(許容値) 1.00	0.50
			引張	$\sigma_t = -$	$f_t = 325$	-
			圧縮	$\sigma_c = 99.4$	$f_c = 264$	0.38
			曲げ	$\sigma_{bx} = 16.0$	$f_{bx} = 325$	0.05
				$\sigma_{by} = 7.9$	$f_{by} = 325$	0.03
			せん断	$\tau_s = 1.6$	$f_s = 187$	0.01
			組合せ(引張+曲げ)	(応力度比) -	(許容値) 1.00	-
			組合せ(圧縮+曲げ)	(応力度比) 0.45	(許容値) 1.00	0.45
	大梁					

第4.-1表 飛来物防護ネットの強度評価結果(小梁・トラス柱) (2/3)

対象	部材	応力度	発生応力度 (MPa)	許容応力度 (MPa)	応力度比
飛来物防護ネット 支持架構	小梁	引張	$\sigma_t = -$	$f_t = 325$	-
		圧縮	$\sigma_c = 37.6$	$f_c = 182$	0.21
		曲げ	$\sigma_{bx} = 82.0$	$f_{bx} = 267$	0.31
			$\sigma_{by} = 42.8$	$f_{by} = 325$	0.14
		せん断	$\tau_s = 18.1$	$f_s = 187$	0.10
		組合せ(引張+曲げ)	(応力度比) -	(許容値) 1.00	-
		組合せ(圧縮+曲げ)	(応力度比) 0.65	(許容値) 1.00	0.65
	トラス柱	引張	$\sigma_t = -$	$f_t = 325$	-
		圧縮	$\sigma_c = 81.4$	$f_c = 239$	0.35
		曲げ	$\sigma_{bx} = 63.5$	$f_{bx} = 325$	0.20
			$\sigma_{by} = 51.0$	$f_{by} = 325$	0.16
		せん断	$\tau_s = 13.9$	$f_s = 187$	0.08
		組合せ(引張+曲げ)	(応力度比) -	(許容値) 1.00	-
		組合せ(圧縮+曲げ)	(応力度比) 0.70	(許容値) 1.00	0.70

第4. -1表 飛来物防護ネットの強度評価結果(鉛直ブレース・水平ブレース) (3/3)

対象	部材	応力度	発生応力度 (MPa)	許容応力度 (MPa)	応力度比
飛来物防護ネット 支持架構	鉛直ブレース	引張	$\sigma_t = -$	$f_t = 325$	-
		圧縮	$\sigma_c = 89.7$	$f_c = 173$	0.52
		曲げ	$\sigma_{bx} = 33.2$	$f_{bx} = 325$	0.11
			$\sigma_{by} = 1.2$	$f_{by} = 325$	0.01
		せん断	$\tau_s = 3.5$	$f_s = 187$	0.02
		組合せ(引張+曲げ)	(応力度比) -	(許容値) 1.00	-
		組合せ(圧縮+曲げ)	(応力度比) 0.63	(許容値) 1.00	0.63
	水平ブレース	引張	$\sigma_t = 61.6$	$f_t = 325$	0.19
		圧縮	$\sigma_c = -$	$f_c = 257$	-
		曲げ	$\sigma_{bx} = -$	$f_{bx} = -$	-
			$\sigma_{by} = -$	$f_{by} = -$	-
		せん断	$\tau_s = -$	$f_s = -$	-
		組合せ(引張+曲げ)	(応力度比) 0.19	(許容値) 1.00	0.19
		組合せ(圧縮+曲げ)	(応力度比) -	(許容値) 1.00	-