

発電用原子炉施設に係る特定機器の設計の 型式証明申請

設置許可基準規則への適合性について (バスケット材料について)

2023.7.19
日立造船株式会社

目次

1. バスケット材料にSG295を適用した理由
2. 考え方と評価方法
3. 材料試験の項目
4. 物性および機械的性質
5. 長期健全性に関する考察
6. 設計評価基準

1. バスケット材料にSG295を適用した理由

1. バスケット材料にSG295を適用した理由

バスケットは、貯蔵時だけでなく輸送時の各試験条件に耐えられる構造強度を持ち、臨界防止をはじめとする各安全機能を満足する設計が要求される。

金属キャスク構造規格では、バスケット材料に適用できる炭素鋼としてJIS G 3118「中・常温圧力容器用炭素鋼鋼板」が規定されていることから、先行例のHitz-B52型では、バスケット材料としてコンパートメントの材質にJIS G 3118のSGV410を適用している。

一般にキャスクの質量は、使用済燃料集合体の**収納体数の増加分だけ（52体→69体）増加する**が、一方でキャスクの**取扱制限重量は先行例（Hitz-B52型）とHitz-B69型で大きく変わらない**。このため、**Hitz-B69型は軽量化が必要**であり、その方法としてバスケット単体の軽量化が有効であることから、**コンパートメントの質量を軽くするためにSGV410と同等の化学成分であり、6mm以下の厚さがJIS G 3116「高圧ガス容器用鋼板及び鋼帯」に規定されているSG295をHitz-B69型のバスケットのコンパートメントに適用**する。

なお、SGV410はJIS G 3118に6mmから200mmまでの厚さが規定されており、一方でSG295はJIS G 3116に1.6mmから6mmまでの厚さが規定されている。したがって、**コンパートメントにSG295を適用することによって、厚さ1.6mmから6mmまでの炭素鋼材料が使用できる**こととなる。

単位 mm

規格	種類の記号	適用厚さ
JIS G 3116	SG295	1.6以上 6.0以下
JIS G 3118	SGV410	6以上 200以下
	SGV450	
	SGV480	

1. バスケット材料にSG295を適用した理由

【SG295の化学成分】

SG295は、金属キャスク構造規格の規定からバスケット材料として適用できるJIS G 3118のSGV410と同等の化学成分及び製造方法といえる熱間圧延鋼材であり、概ね同等の機械的性質を有している。

下表にJIS G 3116に規定されたSG295とJIS G 3118に規定されたSGV410、SGV450及びSGV480の化学成分及び機械的性質を示す。

規格	種類の記号	化学成分 (%)				
		C	Si	Mn	P	S
JIS G 3116	SG295	≤0.20	≤0.35	≤1.00	≤0.020	≤0.020
(参考) JIS G 3118 (≤12.5mm)	SGV410	≤0.21	0.15~0.40	0.85~1.20	≤0.020	≤0.020
	SGV450	≤0.24	0.15~0.40	0.85~1.20	≤0.020	≤0.020
	SGV480	≤0.27	0.15~0.40	0.85~1.20	≤0.020	≤0.020

規格	種類の記号	機械的性質				
		降伏点 又は耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	曲げ性	
					曲げ角度	内側半径
JIS G 3116	SG295	≥295	≥440	≥26	180°	厚さの1.5倍
(参考) JIS G 3118 (≤12.5mm)	SGV410	≥225	410~490	≥19	180°	厚さの0.5倍
	SGV450	≥245	450~540	≥17	180°	厚さの0.75倍
	SGV480	≥265	480~590	≥15	180°	厚さの1.0倍

2. 考え方と評価方法

2. 考え方と評価方法

バスケット材料の選定基準

【バスケットを軽量化する理由】

- 使用済燃料集合体の増加（52→69体）に伴いキャスクの質量が増加する
- キャスクの取扱制限重量はクレーン容量の制限から増加できない
- キャスクの軽量化にはバスケット単体の軽量化が有効

【バスケット材料の課題】

- ステンレス鋼は炭素鋼に比べて熱伝導率が低い
- ステンレス鋼は密度が高く炭素鋼より重い
- 金属キャスク構造規格でバスケットに適用できる炭素鋼はSGV材しかない
- SGV材は6mm以下の厚さが規定されていない（薄くできない）
- SGV材は寸法公差が大きく（-0.25mm/+0.75mm）不用意に本体胴とバスケットの隙間を小さくできない

【バスケット材料への要求事項】

- 設計貯蔵期間の60年間を通じて温度、放射線等の環境条件下で**経年変化による構造強度への影響がないこと**
- 破壊靱性要求を満足すること（薄板は脆性破壊が生じにくいことから厚さ16mm未満は考慮不要）
- **除熱機能を満足する熱伝導性を有すること**
- クリーブ温度域（絶対温度で融点の1/3以上）で使用する場合はクリーブ特性を考慮すること（クリーブ温度未満の場合は考慮不要）
- 腐食環境では腐食を考慮すること（腐食環境でない場合は考慮不要）

SG295の設計用強度

【SG295を適用する理由】

- バスケット材料としてJSMEに規定されている**SGV410と同等の化学成分**であり**概ね同等の機械的性質**を有していること
- 使用温度が300℃以下なら設計貯蔵期間60年間を通じて**経年変化による構造強度への影響がないこと**
- 不活性ガス環境下なら**腐食を考慮する必要がないこと**
- 熱間圧延鋼材であるため6mm以下の薄板なら内部欠陥が生じにくく**脆性破壊を考慮する必要がないこと**
- 使用温度が300℃以下ならクリーブ温度域に到達しないため**クリーブを考慮する必要がないこと**
- ステンレス鋼に比べて**熱伝導性が高いこと**
- 寸法公差が小さいこと（±0.16mm～±0.35mm）

【材料試験】

- JSME新規材料採用ガイドラインに基づいて材料試験を実施
- 基本的化学成分、化学成分制限、機械的性質の常温の規格値、寸法制限及び寸法公差等はJIS G 3116に準拠
- 材料試験により、応力-ひずみ特性、高温及び低温引張特性及びその他特性（線膨張係数、熱伝導率、温度伝導率、縦弾性係数、ポアソン比）を取得
- 破壊靱性試験、クリーブ試験、腐食試験等は、使用条件から考慮する必要がないため未実施

【設計用強度の規定】

- JSME新規材料採用ガイドラインに基づいて保守的に設計用強度を設定

3. 材料試験の項目

3. 材料試験の項目

項目		JIS G 3116 準拠	材料試験	備考
(1) 材料の基本化学成分及び用途				用途: 金属キャスク
(2) 材料の仕様	a. 適合規格			JIS G 3116: 2013
	b. 化学成分制限	○	—	
	c. 機械的性質(常温の規格値)	○	—	
	d. 寸法制限(径、厚さ)	○	—	
	e. 形状寸法(寸法公差)	○	—	
(3) 使用条件	a. 適用範囲			バスケット材料
	b. 温度範囲(最高温度、最低使用温度)			-20°C~300°C
	c. 外圧設計が必要な機器等への適用の有無			なし
(4) 特徴及び使用上の留意事項	a. 特徴			熱間圧延による6mm以下の炭素鋼鋼板及び鋼帯
	b. 新規材料に関する特許及びライセンスの有無			なし
(5) 製造工程及び製造条件	a. 製造方法			連続鋳造 → スケール除去 → 粗圧延 → 熱間仕上圧延
	b. 熱処理			なし
	c. 検査	○	—	
(6) 化学成分(溶鋼分析又は溶湯分析、製品分析)		—	○	
(7) マクロ及びミクロ組織		—	未実施	
(8) 実用試験(へん平試験、押し広げ試験)		—	未実施	
(9) 加工性、加工条件		○	—	

3. 材料試験の項目

項目		JIS G 3116 準拠	材料試験	備考
(10) 機械的性質	a.引張特性	—	○	
	b.靱性	—	未実施	6mm以下の薄板であるため不要
	c.硬さ	—	未実施	6mm以下の薄板であるため不要
(11) 応力-ひずみ特性		—	○	
(12) 高温及び低温引張		—	○	室温/65°C/100°C/150°C/200°C/250°C/300°C/ 350°C/400°Cの各温度で実施
(13) クリープ及びクリープ破断特性		—	未実施	使用温度がクリープ温度域を下回るため不要
(14) 時効後靱性		—	未実施	時効性材料ではないため不要
(15) 溶接性(溶接性、溶接区分)		—	未実施	炭素量が0.3%以下の炭素鋼であるため不要
(16) 耐食性		—	未実施	不活性ガス環境下での使用のため不要
(17) 設計降伏点				JSME新規材料採用ガイドラインに準拠して設定
(18) 設計引張強さ				
(19) 設計応力強さ				
(20) 許容引張応力				
(21) 疲労		—	未実施	JSME金属キャスク構造規格 設計疲労線図(炭素鋼)を適用
(22) その他特性	a.線膨張係数	—	○	20°C/100°C/150°C/200°C/250°C/300°C/350°C/ 400°Cの各温度で実施(設計に用いる線膨張係数の規格値 はJSME材料規格[TE1]を適用)
	b.熱伝導率	—	○	
	c.温度伝導率	—	○	
	d.縦弾性係数	—	○	-75°C/20°C/100°C/150°C/200°C/250°C/300°C/ 350°C/400°Cの各温度で実施(設計に用いる縦弾性係数値 の規格値はJSME材料規格[E1-1]を適用)
	e.ポアソン比	—	○	

4. 物性および機械的性質

4. 物性および機械的性質

- 材料の各温度における設計降伏点 S_y (MPa)

記号	温度 (°C)												
	-30 ~40	65	75	100	125	150	200	225	250	275	300	325	350
SG295	295	283	280	273	268	266	266	266	266	266	266	266	260

- 材料の各温度における設計引張強さ S_u (MPa)

記号	温度 (°C)												
	-30 ~40	65	75	100	125	150	200	225	250	275	300	325	350
SG295	440	416	410	399	393	391	391	391	391	391	391	391	391

- 材料の各温度における設計応力強さ S_m (MPa)

記号	温度 (°C)												
	-30 ~40	65	75	100	125	150	200	225	250	275	300	325	350
SG295	146	146	146	146	144	143	143	143	143	143	143	143	143

4. 物性および機械的性質

- 材料の各温度における許容引張応力 S (MPa)

記号	温度 (°C)												
	-30 ~40	65	75	100	125	150	200	225	250	275	300	325	350
SG295	125	125	125	125	123	123	123	123	123	123	123	123	123

- 材料の各温度における縦弾性係数 (JSME材料規格) ($\times 10^3$ MPa)

記号	温度 (°C)									
	-75	25	100	150	200	250	300	350	400	450
E1-1	209	202	198	195	192	189	185	179	171	162

- 材料の各温度における線膨張係数 (JSME材料規格) ($\times 10^{-6}$ mm/mm°C)

記号	区分 (注)	温度 (°C)																
		20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425
TE1	A	11.5	12.0	12.3	12.7	12.9	13.2	13.5	13.8	14.0	14.3	14.6	14.9	15.1	15.4	15.7	15.9	16.1
	B	11.5	11.8	11.9	12.1	12.3	12.4	12.6	12.7	12.9	13.0	13.2	13.3	13.4	13.6	13.7	13.8	14.0

(注) 区分Aは瞬時線膨張係数、区分Bは常温から各温度までの平均線膨張係数を示す。

5. 長期健全性に関する考察

金属キャスクの設計貯蔵期間は60年間程度に設定され、貯蔵時並びに貯蔵後の輸送時に必要とされる機能の健全性を、設計貯蔵期間を通じて維持することが求められる。したがって、金属キャスクの構成部材は設計貯蔵期間の経年変化の要因を考慮し、必要とされる強度、性能を維持する必要がある。SG295（炭素鋼）をバスケット材料として使用する場合、期待する機能は収納する使用済燃料を保持するための構造強度であるため、経年変化による強度低下について検討する必要がある。

以下のように、経年変化の要因として熱的影響、放射線照射による影響及び腐食の影響を考慮し、SG295をバスケット材料とした金属キャスクが60年間の供用状態にあった場合について考察し、当該期間において構造強度への影響がないことを確認する。

【熱的影響】

金属キャスクに収納する**使用済燃料の制限温度が約300℃**であることから、**バスケット材料の最高温度は同程度の温度**となる。短期的な影響は、400℃までの高温引張試験結果より、400℃までの範囲では機械的性質は著しく劣化しないことが確認されている。

長期健全性の観点からクリープについて検討する。

一般に炭素鋼は約400℃を超えるとクリープによる破壊が問題となり^[1]、また、**クリープによる変形を考慮すべき温度は一般に融点（絶対温度）の約1/3**といわれる^[1]。したがって、炭素量0.2%以下の炭素鋼（SG295）は、融点が約1500℃であることから、**約300℃まではクリープによる破断及び変形を考慮する必要はないため、構造強度への影響はない。**

【放射線照射による影響】

使用済燃料から放出される放射線は中性子線及び γ 線である。放射線の種類及びそのエネルギーによって金属材料の性質に作用する形態は異なると考えられるが、**バスケット材料の劣化機構としては、中性子照射による脆化が考えられる。**

中性子照射による脆化は、設計貯蔵期間を通じた中性子照射量から評価できる。Hitz-B69型では、使用済燃料69体を収納した条件で、中心付近のコンパートメントの**60年間の中性子照射量は $2.2 \times 10^{15} \text{n/cm}^2$** と評価されている。炭素鋼及び低合金鋼に関しては、鋼種によらず **10^{16}n/cm^2 まで顕著な脆化は認められない^[2]**ため、構造強度への影響はない。

【腐食による影響】

通常、金属キャスク（密封容器）内部は使用済燃料装荷時に真空乾燥を行い、不活性ガスであるヘリウムが充填される。そのため、**不活性ガス環境が貯蔵期間中維持されていれば、腐食による劣化は問題とならない**と判断できる。

厳密には、真空乾燥時に水や酸素に起因する腐食や、使用済燃料が破損した場合に放出される腐食性気体による腐食を考慮する必要がある。しかし、前者は残留する濃度を管理することで機能に影響を及ぼさない残留量とすることが可能であり^[3]、後者は1%燃料破損相当の燃料棒内ガス中のヨウ素ガスを含む実機模擬環境における、鉄系材料の最大腐食速度により、60年間の腐食量を保守的に推定しても0.5mm^[4]程度であり、仮に**1%燃料破損相当の燃料棒内ガス中のヨウ素ガスの存在を考慮しても、バスケットの腐食による構造強度への影響はない。**

[1] 木村 一弘, “耐熱鋼のクリープ破断寿命予測”, 日本機械学会誌, 73巻, 5号, p.323-333, 2009.

[2] K.Ferrell, S.T.Mahmood, R.E.SStoller, L.K.Mansur, “An evaluation of low temperature radiation embrittlement mechanisms in ferritic alloys”, Journal of Nuclear Materials, vol.210, 3, pp.268-281, 1994.

[3] AESJ-SC-F002 : 2010, 使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準 : 2010, (社)日本原子力学会.

[4] (独)原子力安全基盤機構, “平成15年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験 最終報告”, 2004.

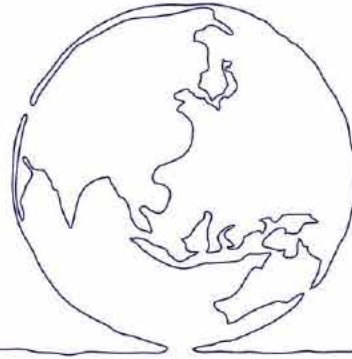
6. 設計基準

【バスケットに適用する評価基準】

金属キャスク構造規格で定められる供用状態A、B、C及びDに対して、バスケットが維持すべき安全機能の観点からバスケットの設計評価基準の考え方を以下に示す。

なお、設計に用いる供用状態A、B、C及びDのそれぞれの評価基準については、金属キャスク構造規格の「バスケット」に従うものとする。

供用状態	A	B	C	D	
具体的な設計事象	貯蔵時	通常取扱時 (吊上げ時等)	衝撃荷重作用時 (異常着床等)	貯蔵時 (Sd*相当地震力が作用する場合)	貯蔵時 (Ss相当地震力が作用する場合) 及び衝撃荷重作用時 (津波荷重作用時等)
	—	通常輸送時	0.3m落下等	—	9m落下等
設計評価基準の考え方	本事象は、長期荷重がバスケットに作用する事象である。 Hitz-B69型のバスケットは、クリープ特性を考慮する必要のない温度領域で使用するため、設計基準の設定にクリープ破断及びクリープ変形を考慮しない。	本事象は、通常使用状態又は繰り返しによる荷重(短期荷重)がバスケットに作用する事象である。 本事象では、臨界防止機能維持のため、バスケットの変形を防止するよう設計基準を設定する。	本事象は、設計貯蔵期間中、まれにしか生じる可能性がない事象である。 本事象では、臨界防止機能維持のため、バスケットの形状が維持されるよう設計基準を設定する。	本事象は、設計貯蔵期間中に発生することは予想されないが、技術的に見れば発生が想定され得る事象である。 本事象では、一般公衆の放射線被ばく防止の観点から、安全機能を著しく損なうことがないように、バスケットの破断を防止するよう設計基準を設定する。 ただし、塑性変形が生じる場合はバスケットの変形量を考慮した臨界解析により臨界防止上有意な変形が生じないことを確認する。	



地球と人のための技術をこれからも

日立造船はつないでいきます。かけがえのない自然と私たちの未来を。

Hitz
Hitachi Zosen

日立造船株式会社 <https://www.hitachizosen.co.jp/>