



Nuclear
Regulation
Authority, Japan

JBREAK における溶融デブリ堆積及び集積モデル開発

日本原子力学会2021秋の大会
令和3年9月9日 WEB開催

○菊池航、堀田亮年
原子力規制庁長官官房技術基盤グループ



本発表の内容

□背景と目的

□THERMOSコード体系におけるJBREAK

□モデル概要

- 液滴発生モデル
- 集積モデル
- デブリ温度及び粒径分布更新モデル
- JBREAK-MSPREADカップリング手法
- MSPREADと集積モデルの組み合わせ

□解析結果

- DEFOR-A実験及び解析条件
- 液滴追跡挙動結果
- デブリベッド高さ分布結果
- 集積デブリ結果
- 粒径分布結果

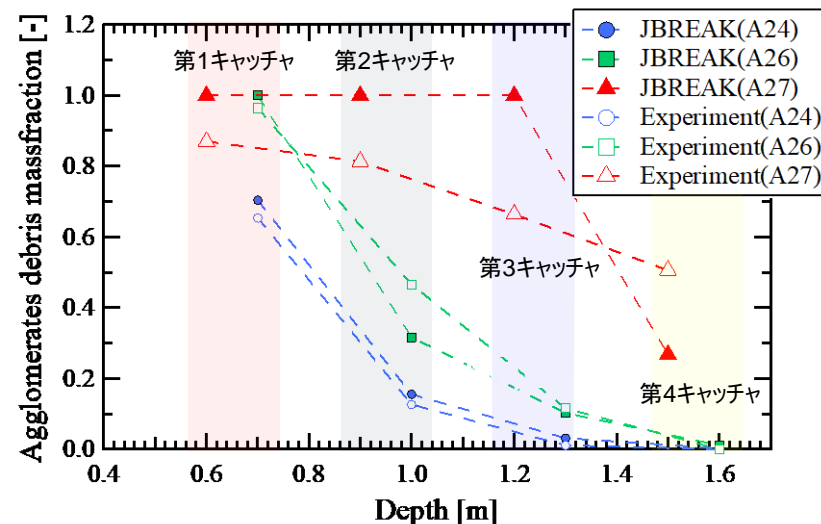
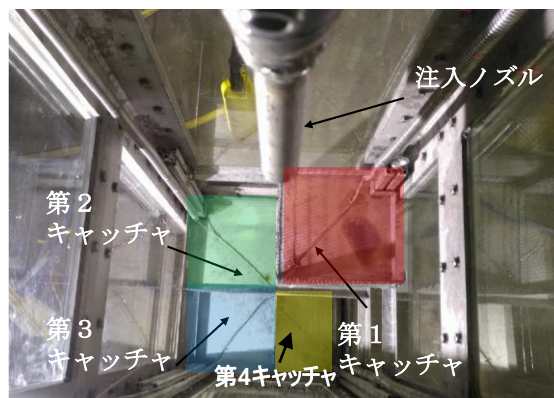
□結言

背景と目的

- SA時には、RPV下部が破損、溶融デブリが落下しキャビティにおいてデブリベッドが形成され、CV機能損失に大きく関わりとされている。
- MELCOR等の総合SAコードではプラント全体の挙動を予想するため、不確かさが大きなデブリベッド形成、冷却過程を単純化して計算している。

デブリベッドの形成や冷却の不確かさを定量的に評価する**THERMOSコードシステム**を開発している。

- KTHにおいて実施したDEFOR-A実験に基づきJBREAKの集積モデルの妥当性の確認を行った。低温過熱度条件では実験を再現できるが、**高温過熱度条件では集積デブリ質量割合の分布の傾向が異なる**ことを確認した。そのため、課題を解決するためJBREAKの改良を行った。



DEFOR-A実験概要図

キャッチャ配置

水深に対する集積質量割合

THERMOSコード体系におけるJBREAK

THERMOS : Transient Removal of MOlten Substances

JBREAK

- ✓ 溶融ジェット分裂
- ✓ 粒子デブリの自由落下
- ✓ 液滴固化
- ✓ 溶融ジェット床面衝突
- ✓ 部分固化粒子デブリの集積デブリ化

解析コードモジュール名

→ 時間積分ループ
 → 情報伝達

THERMAT

- ✓ 物性値ライブラリ

DPCOOL

- ✓ プール-粒子層二相流伝熱流動
- ✓ 乱流エネルギー
- ✓ 不均質デブリベッド熱伝達
- ✓ セルフレベリング, etc.

MSPREAD

- ✓ キャビティ床面上溶融デブリ拡がり

REMELT

- ✓ 高温固相-溶融相間の相互作用による流路閉塞・再溶融

多次元MCCI
CORCAAB

コンクリート侵食面更新





本発表の内容

□背景と目的

□THERMOSコード体系におけるJBREAK

□モデル概要

- 液滴発生モデル
- 集積モデル
- デブリ温度及び粒径分布更新モデル
- JBREAK-MSPREADカップリング手法
- MSPREADと集積モデルの組み合わせ

□解析結果

- DEFOR-A実験及び解析条件
- 液滴追跡挙動結果
- デブリベッド高さ分布結果
- 集積デブリ結果
- 粒径分布結果

□結言

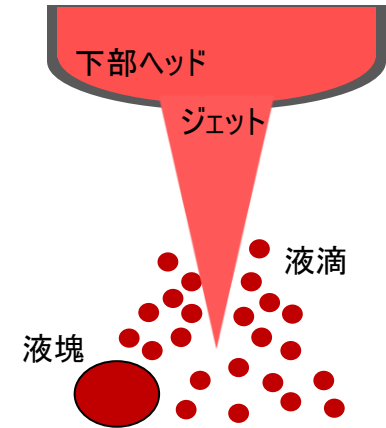
液滴発生モデル

□ ジェット分裂モデル

MC3Dコード^[1]を参考にし、ジェット界面の法線ベクトルとセル中心の速度ベクトルのなす角度 θ に基づき、ジェットと液塊でモデルを切り替える。

ジェット: Kelvin-Helmholtz(K-H)不安定性モデル

液塊: Rayleigh-Taylor(R-T)不安定性モデル



□ 液滴粒径分布モデル

- ✓ 計算負荷を考慮し、JASMINEコード^[2]を参考に、“待機液滴群”を設け、発生した液滴を充填し、Rosin-Rammler分布に基づき単一粒径: d_p を求める。
- ✓ d_p から“待機液滴群”に含まれる液滴粒子1個当たりの質量: m_p と液滴粒子数: N_p を計算する。
- ✓ 閾値を超えた場合、保存された液滴を“液滴群”として放出する。

$$d_p = D_e (-\ln(1-F))^{1/n}$$

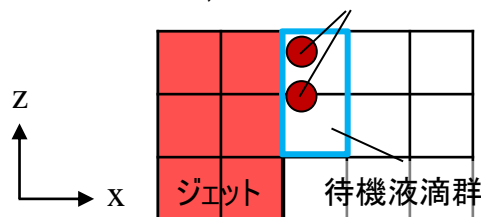
$$m_p = \rho_p \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_p}{2}\right)^3$$

$$N_p = \frac{\Delta M}{m_p}$$

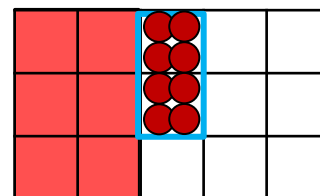
粒度特性数: D_e
一様乱数: F
分布定数: n

液滴密度: ρ_p
液滴群質量: ΔM

KH, RTモデルによって発生した液滴

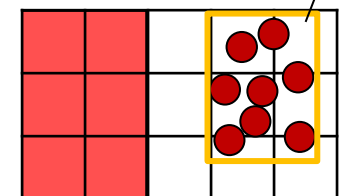


RR分布に基づき液滴粒子数を計算



液滴が追加される度に液滴粒子数を更新

$$N_p \geq \text{Threshold}$$



計算領域へ放出

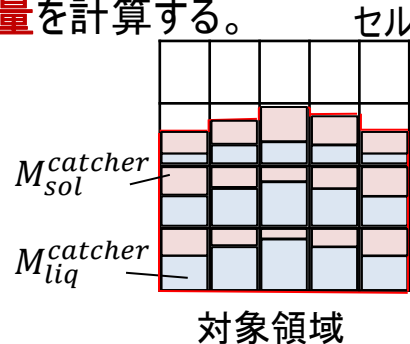
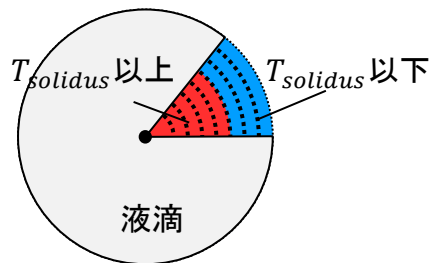
[1] R.Meignen, et al., Comparative Review of FCI Computer Models Used in the OECD SERENA Program. Proceedings of ICAPP-05, Seoul, KOREA, May 15-19, Paper 5087

[2] K. Moriyama et al., Simulation of melt jet breakup experiments by JASMINE with an empirical correlation for melt particle size distribution, Nuclear Science Technology, 2016

集積モデル

□ KTHのKudinovによって提案された式^[1]を三次元CFDに拡張

- ✓ 液滴一つずつ液滴半径方向の固相線温度領域に基づき固化割合: f_{sol} を計算し、堆積する液滴群を固化液滴($f_{sol} \geq 50\%$)と微固化液滴($f_{sol} < 50\%$)に分類する。
- ✓ **液滴の流動計算終了時**に対象領域に堆積した微固化液滴: M_{liq} の総質量に基づき**対象領域全体で平均化された集積デブリ質量**を計算する。



集積係数

全体の集積デブリ質量: $M_{agg}^{catcher} = \alpha \times M_{liq}^{catcher}$

微固化液滴の質量

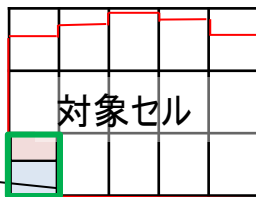
□ 改良集積モデル

- ✓ **毎タイムステップ毎に各セル**における微固化液滴の質量割合を求める。
- ✓ **各セルにおける集積デブリ質量**を求め、全てのセルで積算を行うことで集積デブリ質量を求める。

セルの集積デブリ質量: $m_{agg}^{i,j,k} = \alpha \times m_{liq}^{i,j,k}$

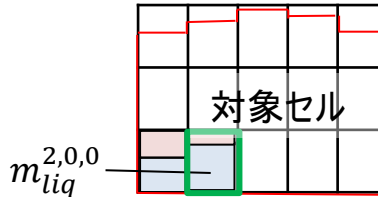
全体の集積デブリ質量: $M_{agg}^{catcher} = \sum m_{agg}^{i,j,k}$

$i=1, j=0, k=0$



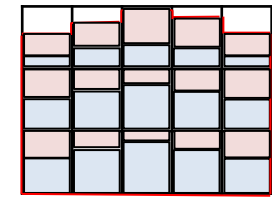
セルにおける質量を計算する。

$i=2, j=0, k=0$



前のセルの質量に、新たなセルの質量を加算する。

$i=n, j=n, k=n$

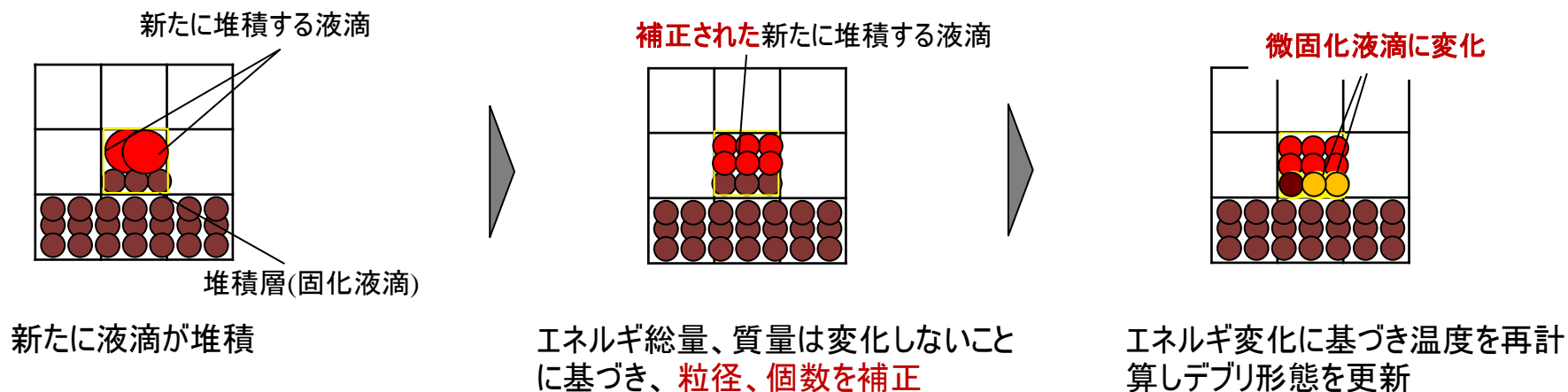


キャッチャ上の全セルの集積デブリ質量を求める。

デブリ形態及び粒径分布更新モデル

□ デブリ追加堆積時エネルギー再配分モデル

- ✓ 堆積層に新たに液滴が到達する場合、堆積層を形成している液滴または粒子の径の差を考慮し、単位体積あたりのエネルギー差を計算する。
- ✓ エネルギー差をそれぞれの体積に対して等分配し、新たに堆積する液滴と堆積層を形成する液滴または粒子の温度を再計算する。
- ✓ 再計算された温度に基づき固化割合を計算し、デブリの形態(固化液滴または微固化液滴)を更新する。



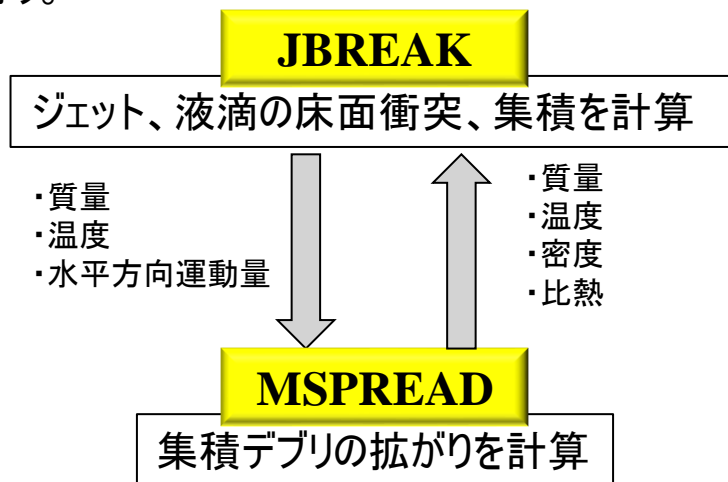
□ 集積を考慮した粒径分布モデル

- ✓ 各タイムステップにおいて、液滴径毎に分類し集積の計算を行い、集積した液滴は粒径分布から取り除くことで粒径分布を更新する。

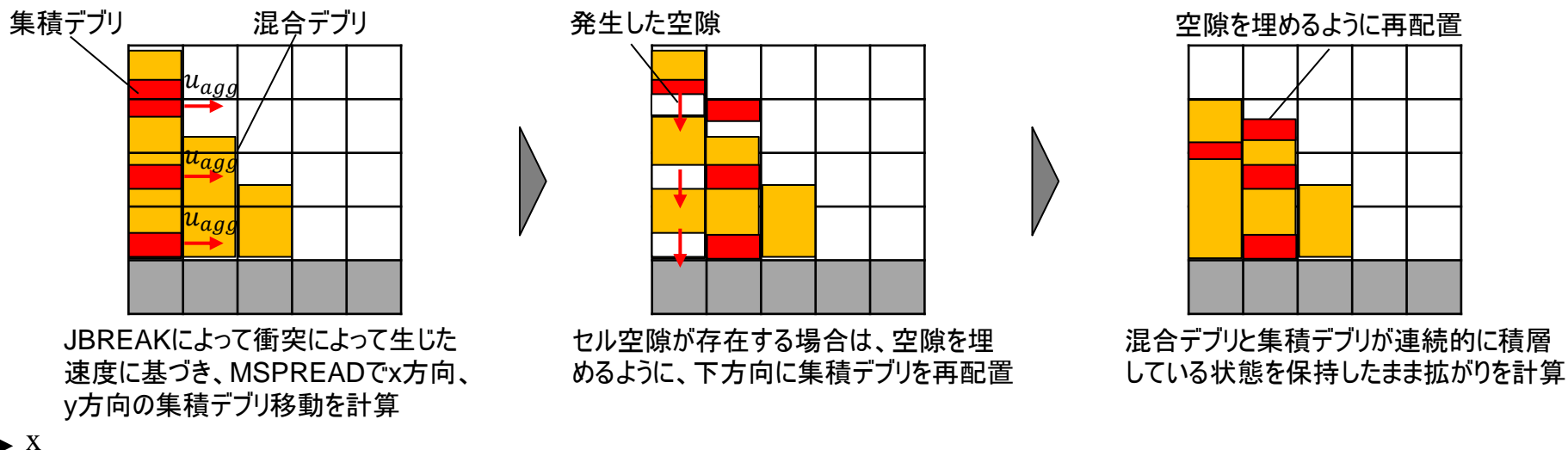
JBREAK-MSPREADカップリング手法

JBREAK-MSPREADインターフェイス

溶融物の拡がり後のクラストの生成等といった過程を効率的なモデルを活用するため専用モジュールのMSPREADとカップリングを行う。



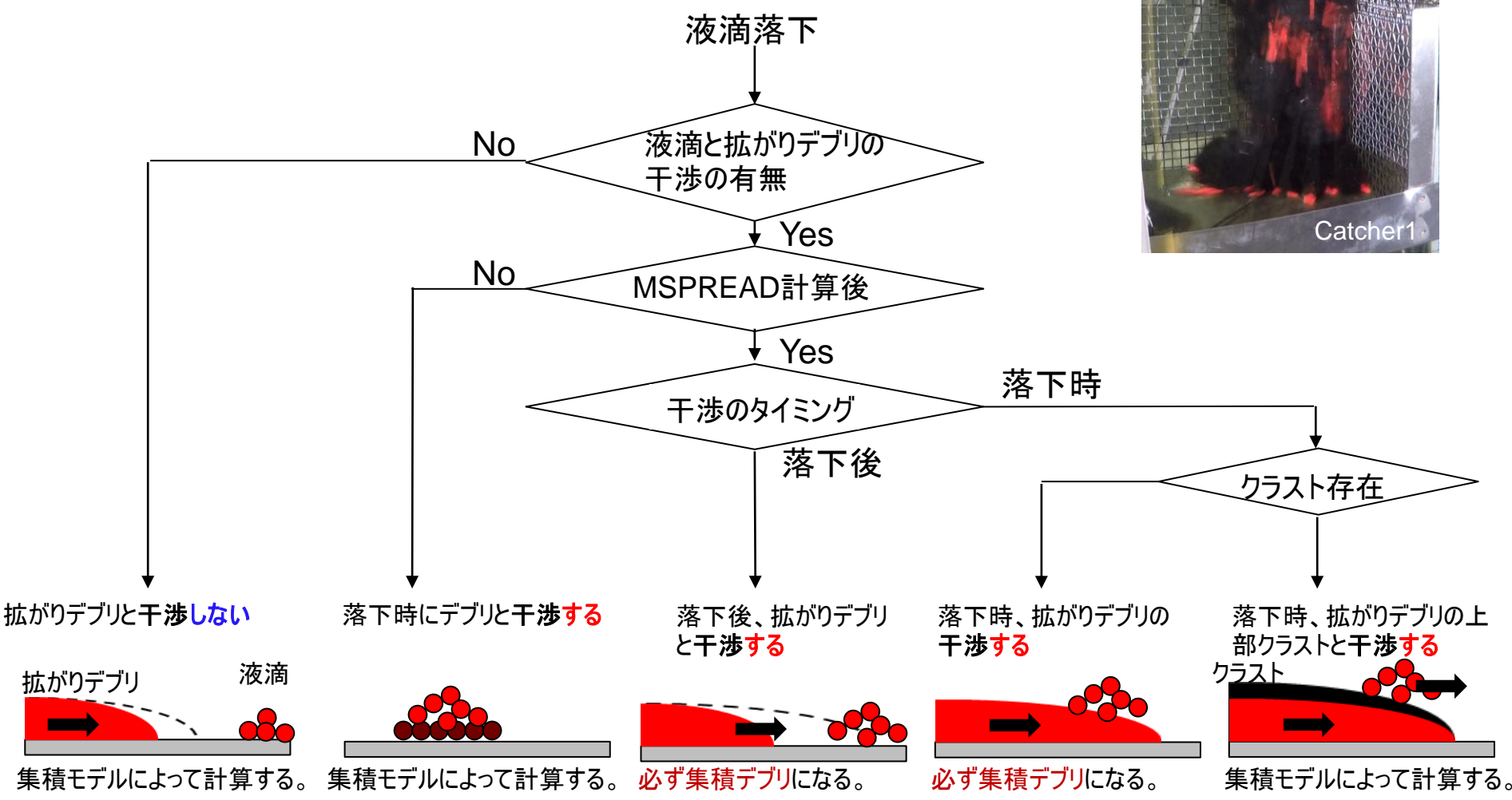
MSPREAD(2次元浅水方程式)による溶融デブリのz軸方向移動方法



MSPREADと集積モデルの組み合わせ

□ 条件分岐

- ✓ 液滴が拡がりデブリと干渉の有無、タイミングで集積モデルを切り替える。
- ✓ **必ず集積デブリ**を形成する場合は、液滴群の質量を、セルに既に堆積している集積デブリの質量に加算する。





本発表の内容

□背景と目的

□THERMOSコード体系におけるJBREAK

□モデル概要

- 液滴発生モデル
- 集積モデル
- デブリ温度及び粒径分布更新モデル
- JBREAK-MSPREADカップリング手法
- MSPREADと集積モデルの組み合わせ

□解析結果

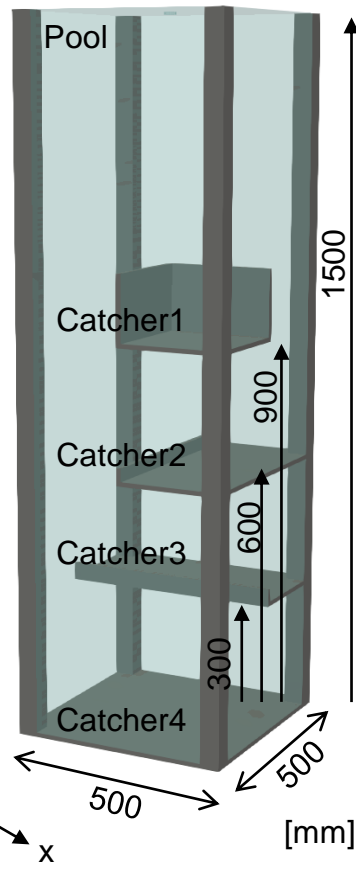
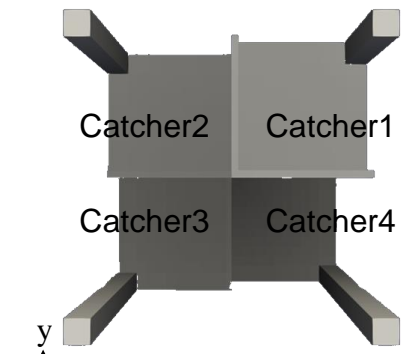
- DEFOR-A実験及び解析条件
- 液滴追跡挙動結果
- デブリベッド高さ分布結果
- 集積デブリ結果
- 粒径分布結果

□結言

DEFOR-A実験及び解析条件

実験条件

模擬溶融物	Bi ₂ O ₃ -WO ₃
溶融物密度 [kg/m ³]	7811
ノズル内径 [m]	0.02
溶融物初期温度 [K]	1342
溶融物初期過熱度 [K]	199
溶融物体積 [L]	3.73
放出時間 [s]	6.92
流量 [L/s]	0.54
ノズル-プール区間 [m]	0.195
水位 [m]	1.5
初期水温 [K]	360
初期サブクール度 [K]	12.5



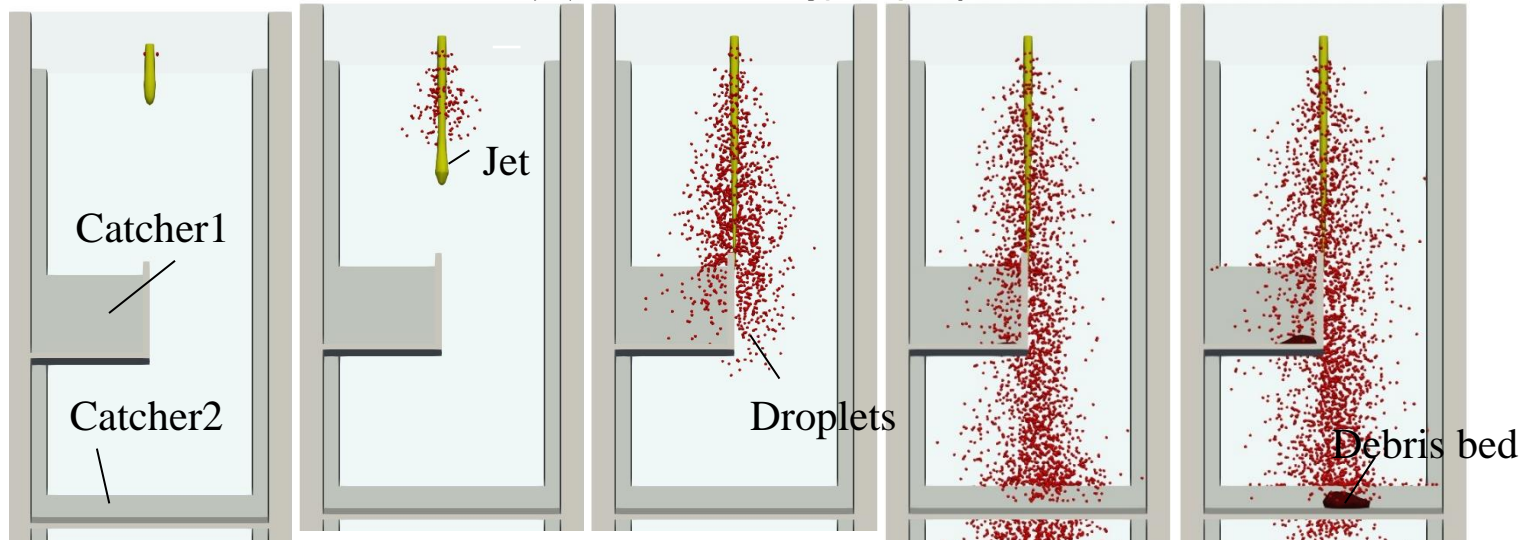
解析体系

解析条件

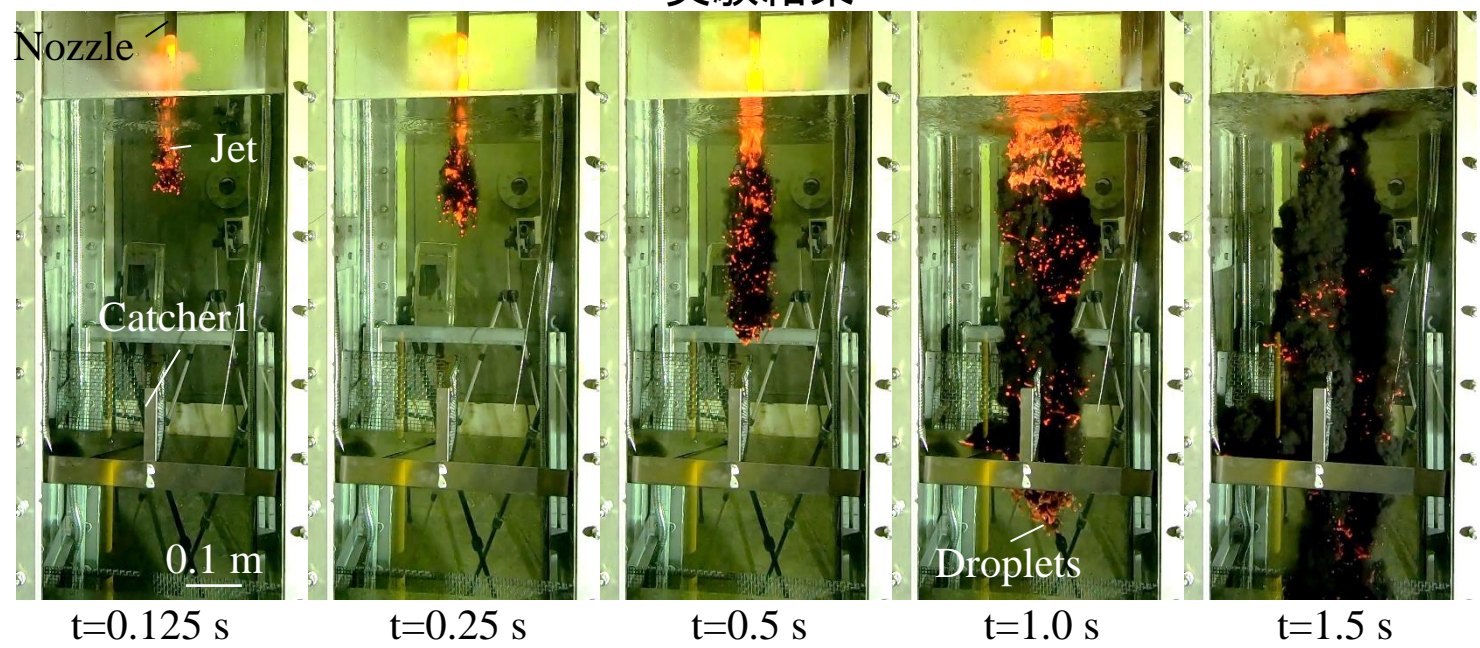
Parameter	JBREAK(Improve)	JBREAK(Old)
JBREAK Input		
タイムステップ [s]	2.1×10^{-3}	
メッシュサイズ [m]	x,y direction: 0.006~0.04 z direction: 0.01~0.024	
CFL	0.54	
プール水面におけるジェット径 [mm]	16.25	
プール水面におけるジェット速度 [m/s]	2.60	
Rosin-Rammler粒度特性数	3.94×10^{-3}	
Rosin-Rammler分布定数	1.8	
液滴発生垂直方向速度 [m/s]	1.0	
液滴発生水平方向速度 [m/s]	2.5	
DPCOOL Input		
タイムステップ [s]	2.5×10^{-3}	
メッシュサイズ [m]	x,y direction: 0.04~0.06 z direction: 0.01~0.058	
初期圧力 [Pa]	1.0×10^5 Pa	
MSPREAD Input		
タイムステップ [s]	5.0×10^{-4}	-
メッシュサイズ [m]	x direction: 0.012~0.02 y direction: 0.012~0.02	-
冷却水の熱伝達モデル	沸騰曲線モデル	-
溶融物の熱伝達係数モデル	THEMAの酸化溶融物モデル	-
粘性係数の補正モデル	Ramacciotti (C=6.0)	-
流動限界固相率 [-]	1.0	-

液滴追跡挙動結果

改良JBREAK解析結果



実験結果

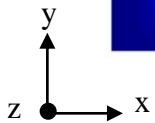
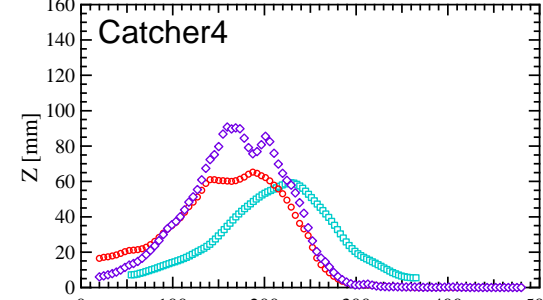
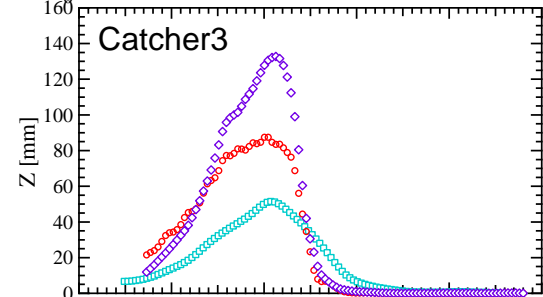
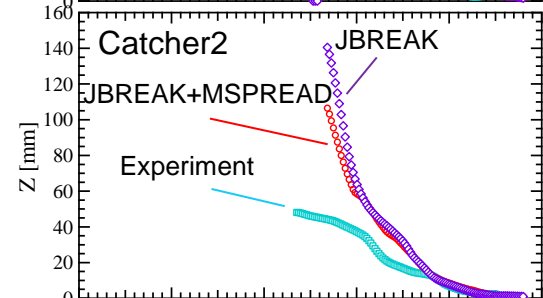
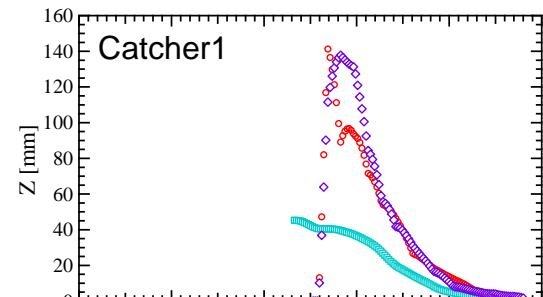
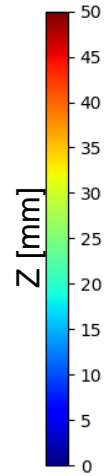
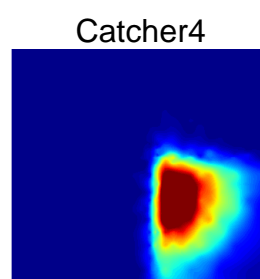
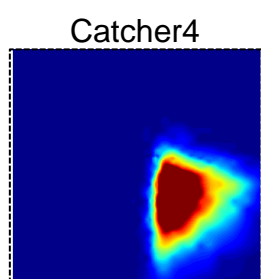
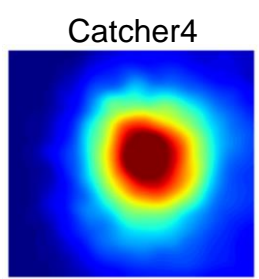
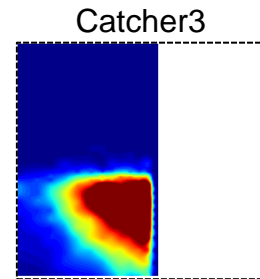
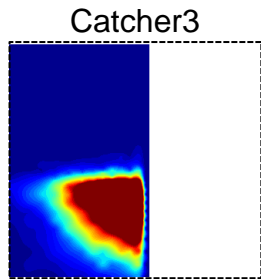
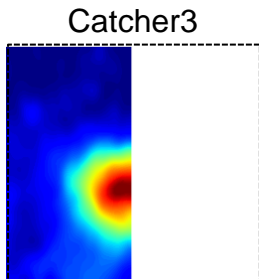
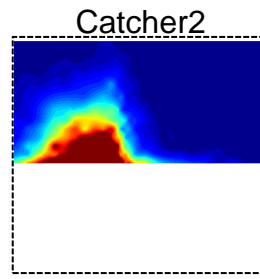
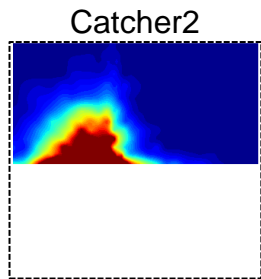
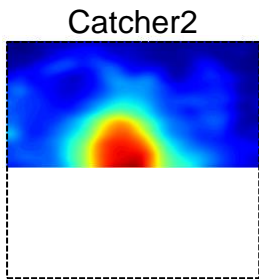
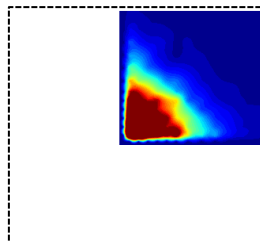
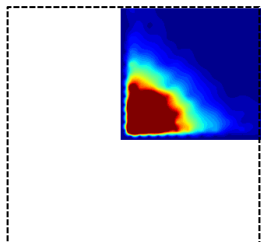
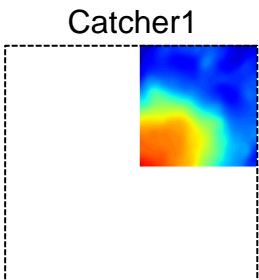


デブリベッド高さ分布結果

Experiment

JBREAK

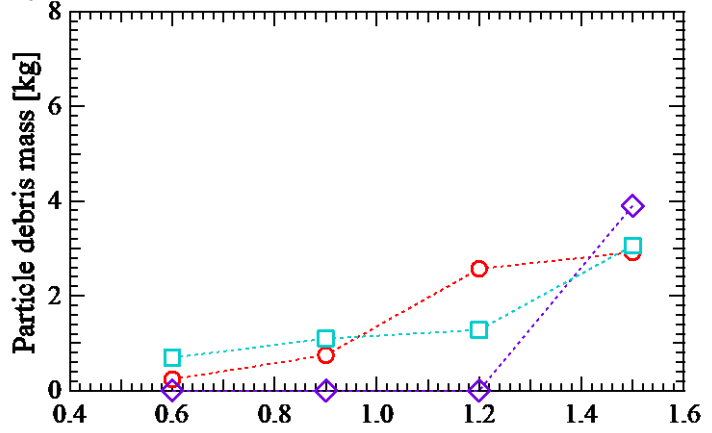
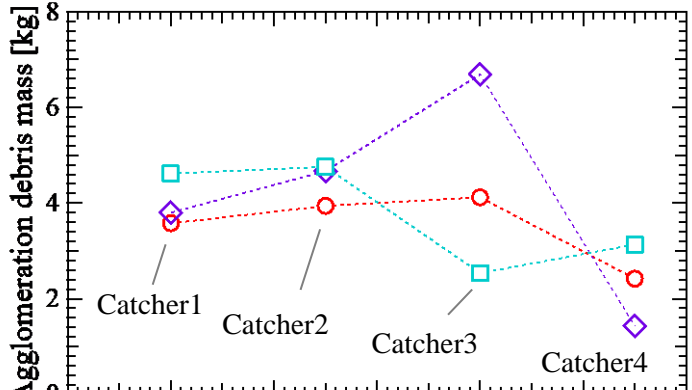
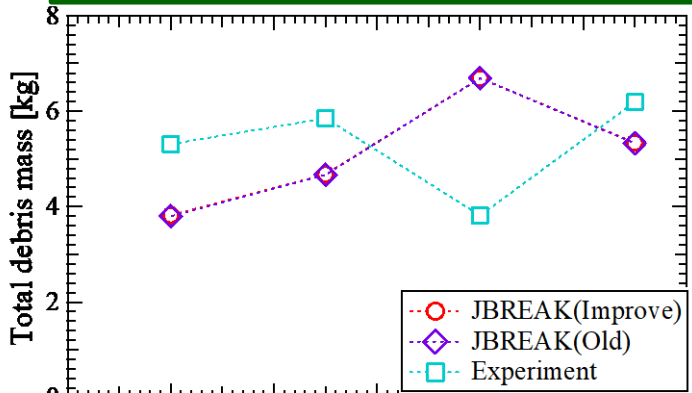
JBREAK-MSPREAD



二次元デブリベッド高さ分布

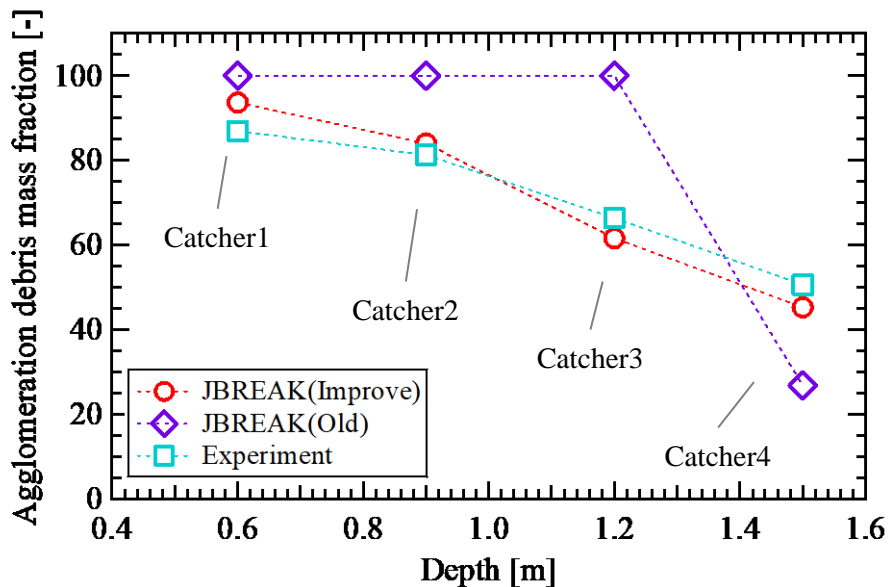
二次元x断面

集積デブリ結果



水深に対する質量の比較

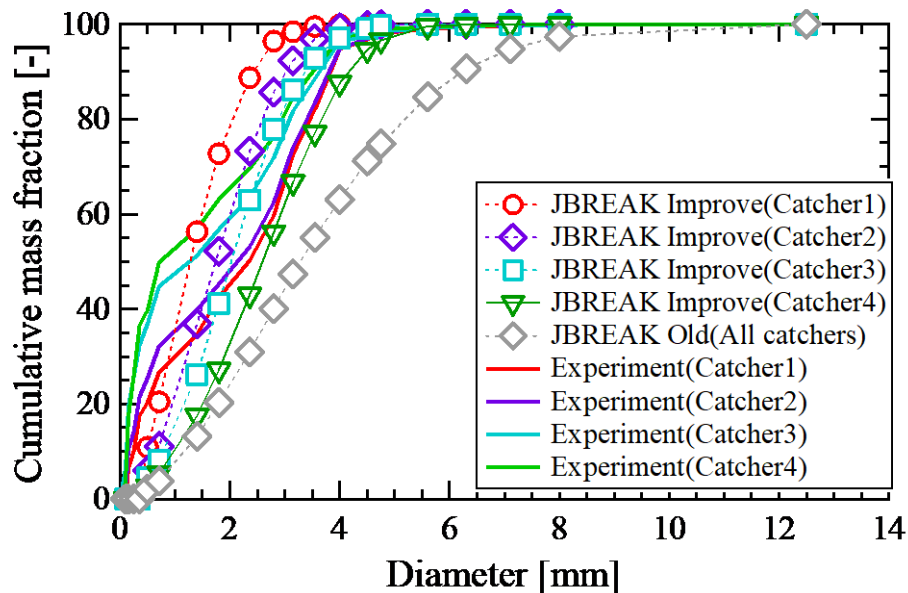
$$\text{集積デブリ質量割合} = \frac{\text{集積デブリ質量}}{\text{全デブリ質量}}$$



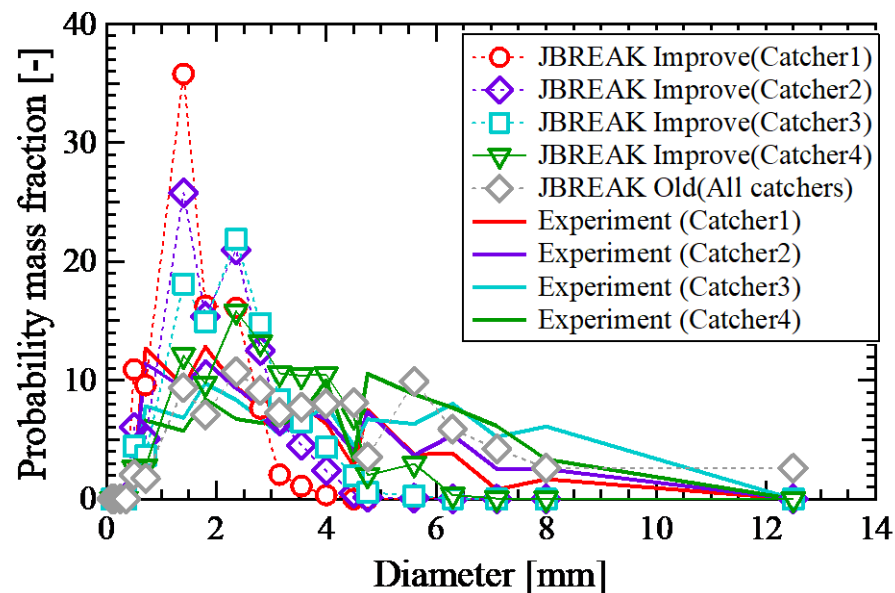
水深に対する集積デブリ質量割合の比較

- ✓ 従来のJBREAKは、キャッチャ1-3において全量が集積デブリ化し、集積デブリ質量割合を過大評価していた。
- ✓ 改良JBREAKは、**全てのキャッチャにおいて実験結果と同様の分布を示し良好な結果を示した。**

粒径分布結果



累積質量分布の比較



確率密度分布の比較

- ✓ 改良集積モデルによって、集積デブリを取り除いた各キャッチャにおける粒径分布を求めることを可能とした。
- ✓ 従来のJBREAKに比べ改良JBREAKは、集積した液滴を除く粒径分布の算出を可能とし実験に近い分布傾向を示した。



□ JBREAKとMSPREADとカップリング手法開発

堆積したデブリ拡がり扱う事を可能とした。

JBREAK単体解析に比べデブリ高さ分布は**実験結果に近い傾向**を示し予測性が向上した。

□ 集積モデル改良

高温条件における**集積現象**扱うことを可能とした。

従来モデルに比べ集積デブリ質量割合は実験結果に**非常に良好な結果**を示し予測性が向上した。

□ 粒径分布モデル改良

液滴の集積デブリ化に伴う粒径分布の変化を扱うことを可能とした。

従来モデルに比べ粒径分布は**実験に近い分布**を示し予測性が向上した。

高温過熱度条件におけるデブリベッド堆積高さ、集積割合の課題を解決するためJBREAKの改良を行った。改良により実験をより再現できることを示した。

ご清聴ありがとうございました。