

鉛冷却高速炉の炉心損傷事故事象解析
— 平成 12 年度成果 —
(研究報告)



2001年3月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ
ください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

鉛冷却高速炉の炉心損傷事故事象解析

－平成12年度成果－

(研究報告)

飛田 吉春[†]、藤田 朋子[†]

藤田 哲史[†]

要旨

核燃料サイクル開発機構では、安全確保を前提に「経済性向上、資源の有効利用、環境負荷低減、核不拡散性の確保」を目標として、実用化に向けて競争力のある高速炉プラントを創出する実用化戦略調査研究を進めている。本報告書では、この調査研究において実用化炉の候補概念の一つとして検討されている重金属冷却高速炉の炉心安全性の特徴を明らかにすることを目的として実施した炉心損傷事故解析における事象進展について報告する。解析の結果、被覆管の溶融移動とプレナムガス放出によるボイド反応度挿入は緩慢であるため、再臨界を駆動することはないことが示された。一方、炉心損傷が進展して崩壊した燃料粒子が単相の鉛冷却材中に分散した状態では、鉛冷却材の流れによる燃料集中で再臨界が駆動される可能性のあることが明らかとなった。また、事故影響の炉容器内格納性の観点からは、高温化した鉛に対する一次系バウンダリ、炉容器内構造物及び崩壊熱除去機能の健全性維持が重要となることが指摘された。

CDA Analysis of Lead-Cooled Fast Reactor

—Results in 2000 —

Yoshiharu TOBITA , Tomoko FUJITA[†]

Satoshi FUJITA[†]

Abstract

The feasibility study for the commercialization of fast reactors is underway in Japan Nuclear Cycle Development Institute, aiming at the achievement of the economic competitiveness, making full use of the natural resources, reduction of the environmental impact and the assurance of the nuclear non-proliferation and safety. This report shows the results of the analysis of the core-disruptive accident in lead-cooled reactor, and thereby discusses the safety characteristics of the heavy metal cooled fast reactors.

The analysis showed that the reactivity increase due to the molten clad relocation and fission gas blowdown was mild and did not lead to the recriticality. On the other hand, it was shown that the motion of disrupted fuel particles in the single phase lead-coolant had a possibility to produce recriticality. In addition, the importance of the integrity of the primary boundary, structures in the reactor vessel, and decay heat removal system against the high temperature lead was pointed out from the viewpoint of the in-vessel retention of the accident consequences.

目次

要旨	I
ABSTRACT	II
1. はじめに	1
2. 解析手法及び解析条件	2
2.1 鉛冷却炉における事象推移	2
2.2 解析手法	2
2.3 解析体系と解析条件	3
2.4 解析ケースの設定	4
3. 解析結果	6
3.1 F P ガス放出無し（ケース 1）	6
3.2 F P ガス放出あり（ケース 2）	7
3.3 自然対流ヘッドを考慮した場合（ケース 3）	8
4. 考察	9
4.1 鉛冷却 MOX 炉における炉心崩壊事故の特徴	9
4.2 鉛冷却 MOX 炉における再臨界回避方策	10
4.3 重金属冷却金属燃料炉の炉心崩壊事故に関する考察	11
4.4 重金属冷却窒化物燃料炉の炉心崩壊事故に関する考察	12
5. 結論	13
参考文献	15
付録 1	29
付録 2	31
付録 3	36
付録 4	40

表目次

表 1 鉛冷却 MOX 炉の設計情報（1）	16
表 2 鉛冷却 MOX 炉の設計情報（2）	17
表 3 鉛冷却 MOX 燃料炉の設計研究における出力流量設定	17
表 4 SIMMER-III を用いた解析における出力流量設定	17
表 5 出力流量比の設定	18

図目次

図 1 鉛冷却 MOX 炉の炉心周辺の幾何形状（燃焼計算体系）	19
図 2 鉛冷却 MOX 炉解析体系の概念図	19
図 3 本解析における流量減衰曲線（内側炉心集合体の流速）	20
図 4 ケース 1 の出力反応度履歴（0~125 s）	20
図 5 ケース 1 の出力反応度履歴（74~86 s）	21
図 6 ケース 1 の出力反応度履歴（85~85.5 s）	21
図 7 ケース 1 の出力反応度履歴（122~124 s）	22
図 8 炉心及びその周囲におけるスティール質量変化（ケース 1：FP ガス放出無し）	22
図 9 ケース 1 における炉心近傍での物質分布の変化	23
図 10 炉心及びその周囲における燃料質量変化（ケース 1：FP ガス放出無し）	23
図 11 炉心近傍での燃料体積率の空間分布と流速（ケース 1：FP ガス放出無し）	24
図 12 ケース 2 の出力反応度履歴（0~400 s）	25
図 13 FP ガス放出によるボイド拡大挙動（ケース 2）	25
図 14 炉心中心部の被覆管温度履歴（ケース 2）	26
図 15 炉心中央部の集合体入口流速	26
図 16 炉心中心部の燃料温度と炉心出口における被覆管・冷却材温度（ケース 3）	27
図 17 反応度と出力の時間履歴（ケース 3）	27
図 18 炉容器内の各領域における冷却材温度（ケース 3）	28

1. はじめに

サイクル機構では、安全確保を前提に「経済性向上、資源の有効利用、環境負荷低減、核不拡散性の確保」を目標として、実用化に向けて競争力のある高速炉プラントを創出する実用化戦略調査研究を進めている^[1]。本報告書では、この調査研究において実用化炉の候補概念の一つとして検討されている重金属冷却高速炉の炉心安全性の観点からの特徴を明らかにすることを目的として実施した炉心損傷事故（CDA: Core Disruptive Accident）における事象進展解析結果について報告する。

平成11年度において実施した重金属冷却高速炉の予備的な炉心崩壊事故解析では、短期間で重金属冷却炉の炉心安全上の特質を把握するという目的から、内部炉心を径方向1メッシュで扱う等の簡易的な解析体系を用いていた。本研究では、炉心部に複数の解析メッシュを割り当てることにより詳細な事象推移評価を行うことを目的としている。

解析の対象炉心としては予備的な炉心崩壊事故解析と同様に、窒化物燃料とダクトレス燃料集合体を採用した BREST-300 炉心^[2]ではなく、大洗工学センターの炉心燃料システムグループによって設計された MOX 燃料とラッパー管を採用した鉛冷却 MOX 炉心を解析対象とする。

本報告書では鉛冷却炉における CDA の事象推移の特性に関する定性的な議論とこれに基づく解析手法の整備、解析体系の作成と解析条件について 2 章で述べ、3 章において解析結果をまとめ、4 章で解析結果に基づいた鉛冷却炉の炉心安全性について議論を行い、5 章で結論としてまとめた。

2. 解析手法及び解析条件

2.1 鉛冷却炉における事象推移

鉛冷却炉では、高い冷却材沸点と密度のために、燃料崩壊挙動とその後の事象推移がナトリウム冷却炉と大きく異なる。ナトリウム冷却炉の代表的な炉心崩壊事故である流量喪失時スクラム不作動（ULOF: Unprotected Loss of Flow）事象では冷却能力と原子炉出力のバランスが崩れることでナトリウムが沸騰してボイド反応度が印加され、炉心の崩壊が加速される。これに対して鉛冷却炉の ULOF では、冷却材である鉛の沸点が燃料被覆管のスティールの融点よりも高いため、被覆管の溶融が単相の鉛冷却材の中で生じることになる。従って CDA の初期の過程では、鉛冷却材の沸騰によってボイド反応度が印加されることなく、被覆管が溶融浮上して炉心から流出することによる正の反応度効果と、ガスプレナム内の FP ガスが被覆管の破損孔を通して放出されることによるボイド反応度の挿入が反応度を上昇させると考えられる。崩壊後の燃料も高沸点の冷却材にクエンチされて固体燃料粒子となり、さらに燃料の密度が冷却材に比べてわずかに小さい（付録 1 参照）ことから、崩壊後の燃料粒子は冷却材中を緩慢に沈降する。このために、燃料のみが集中して反応度が急上昇するような現象は起こりづらく、鉛冷却炉における CDA の事象推移は緩慢なものになると予想される。

2.2 解析手法

ULOF 等の起因事象発生後の燃料崩壊挙動は、燃料ピンの崩壊挙動を詳細に解析できる SAS4A コード^{[3]-[5]}で解析すべきであるが、SAS4A コードの冷却材物性を鉛に置き換えることは容易ではなく、また冷却材未沸騰状態での被覆管の溶融移動、及び燃料崩壊後の燃料粒子の運動を SAS4A が安定に解析できるか不明であるため、本研究では、起因事象の発生時点から SIMMER-III コード^{[6], [7]}を適用して事象推移を解析する。SIMMER-III のピンモデルは簡易であるため、急速な出力変動による燃料ピンの崩壊挙動は適切に取り扱えない可能性があるが、Pb-MOX 炉での燃料崩壊は、冷却材が未沸騰状態で被覆管の溶融が進行する緩慢なものになると予想され、SIMMER-III を CDA の初期から適用することは適切であると考えられる。

さらに、本研究では鉛冷却炉における主要な反応印加要因であるガスプレナムからの FP ガス放出によるボイド反応度印加を考慮するために、SAS4A のプレナムガス放出モデル PIPFLO^[8]を SIMMER-III へ移植した（付録 2 参照）。SAS4A では上下一方のガスプレナムからのガス放出をモデル化しているが、SIMMER-III へ移植する際に両方のガスプレナムからの放出を扱えるようにモデルを改良した。今回の鉛冷却炉解析を実施するに当たり、使用したコレクションセットを付録 3 に示す。

2.3 解析体系と解析条件

本研究において解析を行った鉛冷却 MOX 炉の設計情報を表 1 及び表 2 に示す。解析の対象としたのは表 1 の通常圧損炉心である。炉心の幾何形状については、炉心の燃焼計算で使用された図 1 を用いる。ナトリウム冷却炉では炉心上方に B_4C の遮蔽体が設置されているが、鉛冷却炉では鉛が反射体としても有効であるため、 B_4C 遮蔽体は不要である。炉心周辺の各構造材の幾何形状は炉心燃料システムグループから提供されたもの以外は高速増殖炉実証炉の設計と同様の形状を仮定して入力データを作成した。炉容器内の構造物の概略形状、及び流路構成は BREST-300 炉とほぼ同様の形状を仮定した。

SIMMER-III による解析体系を図 2 に示す。径方向はダウンカマーまで、軸方向は下部プレナムからカバーガスまでを径方向 10 メッシュ、軸方向 24 メッシュでモデル化する。内側炉心には径方向 3 メッシュ、外側炉心には径方向 2 メッシュがそれぞれ割り当てられる。BREST-300 炉では冷却材は炉容器内の液面よりも高い位置にポンプで汲み上げられ、その水頭圧力差を駆動力として循環している。解析体系では、ダウンカマー上部に圧力境界条件を与えることでこの水頭圧力を模擬するようにした。鉛冷却 MOX 炉の炉心各リング毎の平均出力密度と流量が表 3 のように与えられている。これは出力密度に応じて炉心出口温度が均一となるように、すなわち全炉心で P/F (出力流量比) 値が一定となるよう決められた流量配分であり、実際の燃焼進展に伴う P/F 値の分布を反映したものではない。このため、本解析では暫定的にナトリウム冷却実証炉炉心における P/F 分布を用いて、各集合体の流量を求める。実証炉炉心は 324 集合体を有する一方、鉛冷却炉炉心は 85 集合体 (5 径方向リング) からなり、炉心内での相対的径方向位置に基づいて、実証炉炉心の P/F 値を平均して鉛冷却炉炉心の各集合体径方向リングに割り当てるにより、鉛冷却炉炉心の P/F 値を決定した (表 5 参照)。

SIMMER-III の核計算モデルによる出力密度分布は TWOTRAN による R-Z2 次元体系で解析されるため、炉心内各リングにおける出力密度評価値は表 4 に示すように設計値と若干異なる。同じく表 4 に示されている解析体系における流量分布は SIMMER-III による出力密度分布を用いて所定の P/F 値となるように設定したものである。設計データによるとピン東部の圧力損失は 1 集合体当たりのナトリウムの流量 407 kg/s に対して 2.76 kg/cm² とされている。SIMMER-III の解析体系ではグリッドスペーサーによる圧力損失の増加を模擬していないことを補正するために構造材と冷却材間の抵抗係数を調整してこの圧力損失が生じるように調整する。内側炉心の燃料集合体の入り口オリフィス係数を 0 として表 3 に示す内側炉心の流量を実現するために冷却材入り口の圧力境界条件を 0.835 MPa とする。この入り口圧力に対応して、定格運転時の下部プレナムの圧力は約 2.0 MPa、炉心中心の

圧力は約 1.5 MPa となる。冷却材出口圧力はカバーガス圧力 0.1MPa に水頭圧力を加えた 0.236MPa とする。

外側炉心集合体、径方向ブランケットの入り口には表 4 の流量となるようにオリフィス係数を設定する。一方、制御棒案内管では、燃料の下方への流出を妨げるような設計は採用されないと想定して、流量調整用のオリフィス係数は炉心上方に設定する。以上の流量配分条件及び出入り口の圧力境界条件を用いて定格出力 (712MW) での定常計算を実施し、50s でほぼ定常状態に達することを確認した。現在の設計では燃料ペレットの温度が与えられていないが、この定常計算結果によると炉心中心部の燃料集合体の最高点温度で 1680 K となり、Na-MOX 炉とほぼ同様の値となっている。

炉心崩壊事故の起因事象としては、ナトリウム冷却炉の ATWS の代表事象である ULOF (Unprotected Loss of Flow) を想定する。流量減少時間は過去の BREST-300 における解析例^[9]から 10 s とする。重金属冷却炉では、ULOF 時においても自然対流ヘッドによって定格の 10~20%程度の流量が確保され、炉心損傷が回避できる可能性があるとされているが、今回の解析は重金属冷却炉の炉心損傷時の特徴を明らかにすることを目的としているため、ほぼ指指数関数的な流量減少曲線を用いる。図 3 に本解析で適用した流量減衰挙動を燃料ピッソの破損直前の 50 s までプロットしたグラフを示す。

2.4 解析ケースの設定

今回の解析では、FPガス放出を考慮しないケース1と考慮するケース2、さらに自然対流ヘッドの影響を考慮したケース3の3ケースの解析を行う。予備解析におけるケース1では鉛冷却炉の CDA における特徴である、被覆管の移動反応度挿入の影響を調べるために、FPガスの放出を抑止し、スティールを速度場1に、燃料と鉛を速度場2に割り当てて解析を行い、被覆管の溶融浮上による反応度印加によって再臨界が駆動されないことを確認した (SIMMER-III は3速度場コードであり、液体成分の相対運動を評価できるが、速度場3はガス成分に割り当てられるため、液体成分は2つの速度場に割り当てる必要がある)。本研究では、さらに炉心の崩壊が進行した後に燃料が鉛冷却材中を沈降することによる影響を評価するため、燃料を速度場1に、スティールと鉛冷却材を速度場2に割り当てる。

ケース2の予備解析では内側炉心に径方向1メッシュを割り当てることで内側炉心全体で同時に被覆管破損時にガスプレナムからのFPガス放出による気泡が発生してボイド反応度が印加されるという保守的な条件で解析を行い、FPガス放出によって再臨界が駆動されることはないことを確認した。ここでは、内側炉心を構成する燃料集合体3リングにそれぞれ径方向メッシュを割り当て、P/F 値の違いによる被覆管破損の非同時性の影響を

評価する。集合体リング間の被覆管破損の非同時性により反応度印加率が低下すると予想される一方で、先行して破損する集合体においては、隣接する健全集合体への下部プレナムを通しての冷却材逆流のために、炉心中心方向へボイドが拡大する可能性もあり、これらの反応度印加に対する増減要因の影響を評価することがこのケースの主な目的である。

重金属冷却炉では、除熱高低差を大きく取ることで ULOF 時においても自然対流ヘッドによって定格の 10~20%程度の冷却材流量を確保でき、かつ冷却材の沸点が高いことから炉心の健全形状を維持できる可能性がある。ケース 1 及びケース 2 では、重金属冷却炉の炉心損傷事故における事象推移の特性を解明するために自然対流ヘッドを無視する（すなわち冷却材密度の温度変化無しとする）想定を行ったが、ケース 3 では冷却材密度の温度変化を考慮して自然対流による冷却材流量確保が可能となる条件で解析を行った。ただし、後述するように、燃料被覆管の温度が 1000K を超えるとクリープ破損によって被覆管が破損すると考えられるため、被覆管の破損温度閾値を 1000K として、F P ガス放出によるボイド反応度印加の影響を評価する。

3. 解析結果

3.1 FPガス放出無し（ケース1）

図4から図7に出力と反応度の時間履歴を示す。図4は計算を行った 0.0 s から 123.6 s までの時間履歴であり、図5は 74 s から 86 s まで、図6は 85 s から 85.5 s まで、図7は 122 s から 123.6 s までの時間履歴を拡大したグラフである。本ケースでは 85 s 付近と 123 s 付近で二回の出力ピークが生じている。

図5に示すように1回目の出力変動は 78 s から 84 s にかけての緩やかな反応度・出力の上昇と、85.2 s における急峻な出力ピークからなっている。この緩やかな出力上昇は被覆管の溶融と浮上によって駆動されている。図8に下部軸プランケット以下の領域、炉心の 1/3 下部、1/3 中央部、1/3 上部、及び上部ガスプレナム領域におけるスティール質量の増減値をプロットしたグラフを示す。被覆管の溶融は 77.5 s に炉心中央部で開始して溶融したスティールが浮上する。これに伴い炉心 1/3 中央部での質量が減少して炉心 1/3 上部の質量が若干増加するが、炉心 1/3 上部の被覆管も溶融浮上することで、炉心 1/3 上部のスティール質量も 81 s 以後は減少に転ずる。上部ガスプレナム領域におけるスティール質量はこの間浮上したスティールによって単調に増加する。図9にはこの間における炉心近辺の物質分布をプロットした図を示す。この図は、径方向は炉心中心 ($I=1$) から径プランケット ($I=8$) まで、軸方向は下部ガスプレナム ($J=4$) から上部ガスプレナム ($J=12$) までの領域における各計算メッシュ内部を、図の右側に示した各成分の体積率に対応する面積割合で塗り分けた図である。77.5 s でスティールの溶融が開始し、85.0 s にかけて溶融と浮上が継続している。83.0 s の時点でラッパー管も溶融して崩壊するため、被覆管の失われた燃料ペレットも支持を失って崩壊し、固体燃料粒子として流路に放出される。同時に、83.0 s に出力が 1 Po を超えて上昇を始めるため、燃料の温度と冷却材温度も上昇し、85.0 s には炉心中心部で鉛の沸騰によるボイド化が生じる。85.1 s における出力ピークはこの鉛沸騰によるボイド反応度の印加によって駆動されており、反応度は 1.0 \$を超過していないものの 0.996 \$まで上昇し、ピークが約 250 Po の出力ピークを生じる。この出力ピークによって炉心の中心部では燃料が溶融するが、その温度は最高地点でも約 3200K 程度である。燃料から鉛冷却材への熱移行によって内側炉心のほぼ全域がボイド化するが、燃料も同時に分散するため反応度は急速に -100 \$以下まで低下する。図10に各領域における燃料の質量の時間変化をプロットしたグラフを示す。85 s 近傍での出力変動で分散した燃料は一部は制御棒案内管を通して炉心下方へ移行するものの大部分は上部ガスプレナム部に移行し、その後重力によって次第に炉心へ沈降してくる。特に炉心の 1/3 下部においては 123 s 近傍の2回目の出力変動までに初期の燃料質量の 133 %程度まで増加している。

図 7 に示すように 2 回目の出力変動は 123 s における緩やかな出力ピークと 123.6 s における厳しい再臨界からなっている。図 11 に 123 s から 123.6 s にかけての炉心近傍の燃料体積率の空間分布と燃料の体積割合を乗じた流速ベクトルをプロットした図を示す。この図では赤色が燃料体積率 70%、紫色が 0% に対応する。123 s の出力ピークは燃料の沈降に伴う反応度上昇によって駆動されており、出力上昇に伴う炉心中心での鉛の沸騰によって出力がいったん低下する。その後、鉛の蒸気泡の上昇によって生じる炉心中心部に向かう冷却材の流れによって炉心内の燃料が炉心中心に集中し 123.5 s の再臨界が駆動される。この再臨界の反応度と出力のピークはそれぞれ約 1.33\$、13600 Po であり、発生エネルギーは約 18.9 FPS である。この出力ピークによって炉心内の燃料平均温度は約 5550 K、局所的な燃料温度のピーク値は約 6500 K、炉心圧力のピーク値も約 130 atm に達するため、炉容器に対する機械的な負荷が発生すると考えられる。また、この時点で炉心内のナトリウム平均温度は約 2800K、下部プレナムでも約 1150K 程度に達しており、高温の鉛によって炉容器の機械的健全性の確保が困難になると考えられる。

このケース 1 の解析から、重金属冷却炉における炉心損傷事象では、燃料を炉心から排出する冷却材の流れが確保されないと燃料の冷却材中の重力沈降と冷却材の流動による燃料集中に駆動されて厳しい再臨界が生じる可能性が排除できない。付録 4 のように燃料粒子の鉛冷却材中での終端速度を概算すると、未破損の燃料ペレットに相当する直径 8 mm の燃料粒子の場合、燃料粒子が単一の場合は 0.46 m/s、燃料粒子の体積率が 30% の場合は 0.35 m/s 等となる。従って、冷却材の上向きの流速がおよそ 0.5 m/s 以上あれば、燃料粒子の沈降による再臨界の発生を防ぐことができる。

3.2 FP ガス放出あり（ケース 2）

本ケースはケース 1 に対して被覆管破損に伴う FP ガスプレナムからの FP ガス放出と燃料溶融時の燃料粒界ガス放出を考慮したケースである。図 12 に本ケースにおける反応度と出力に時間履歴を示す。流量減少開始後約 65 s の時点で炉心中央部の集合体の炉心上部 1/4 の位置で被覆管温度が破損条件（被覆管融点-150 K）に達して FP ガスが放出される。放出された FP ガスのボイド領域は図 13 に示すように炉心中心へも若干広がるが、その大半は炉心上方へ拡大するため、中性子漏洩の効果によってボイド反応度の印加が緩和され、反応度は 0.6 \$程度まで上昇するが、再臨界には至らない。本ケースは 400 秒まで解析を実施したが、炉心は破損せずに解析を終了している。図 14 に炉心中央部の炉心高さ中心における被覆管の温度履歴を示す。被覆管の温度は数 100 秒の周期で振動しているが、これは被覆管が破損して FP ガスが放出されるとその浮力によって上向きの冷却材流速が駆動され、炉心下方の低温の冷却材が炉心内に侵入してくるためである。このような FP ガス放出に

伴う冷却流の加速は、その集合体自身における FP ガス放出のみでなく、他の集合体における FP ガス放出の場合においても放出された FP ガス気泡が上部プレナムに到達すれば同様に上向きの冷却材が流れが駆動される。このため、今回の解析で計算を実施した 400 秒までの時間範囲では炉心内の被覆管が溶融するまでに至っていない。今回の解析では、計算機資源の制約から 400 秒の時点で計算を打ち切ったが、炉心内全ての集合体において FP ガス放出が完了した後は、被覆管の溶融浮上に続いて固体燃料粒子の沈降による反応度上昇が生じ、ケース 1 と同様の事象推移になると予想される。

3.3 自然対流ヘッドを考慮した場合（ケース 3）

図 15に本ケースとケース 1 の炉心中心部の集合体入り口における鉛流速の時間変化を示す。自然対流ヘッドを考慮していないケース 1 では 60 s の時点で流速がほぼ 0 となるのにに対して、鉛冷却材密度の温度変化を考慮して自然対流ヘッドが生じる条件を適用している本ケースでは、ほぼ準定常状態となった 200 s の時点で定格流量の約 20 %である 0.62 m/s の流速が確保されている。このために、炉心中心部の集合体出口における冷却材温度と燃料被覆管の最高温度は図 3-2 に示すように 100 s の時点でそれぞれ約 1010 K と 1050 K を最高値とした後に 980 K 及び 950 K で準定常状態となる。図 16の炉心中心部での燃料ペレット平均温度もピーク値で 1520 K であり、燃料溶融及び破損は生じない。燃料被覆管も融点に達しないため、溶融破損することはない。しかしながら、被覆管はその温度が 1000 K に達すると数秒でクリープ破損すると考えられるため、本解析では被覆管温度が 1000K に達した時点で被覆管が破損し、FP ガス放出が生じるという条件を適用した。このため FP ガス放出が流量減少開始後 44 s の時点で発生し、これによる流量と温度の変動が図 15、図 16、及び図 17の反応度と出力の時間履歴に現れている。FP ガス放出はケース 2 と同様に炉心出口近傍で発生し、かつ放出された気泡は主に炉心の上方向へ拡大するためにボイド反応度が挿入されることなく、負の反応度が印加される。反応度は燃料の温度上昇によるドップラー反応度のため、250 s の時点でわずかに負の値に維持されており、出力は定格出力の約 40 %に低下している。

以上のように、鉛冷却 MOX 炉では自然対流ヘッドによる冷却材流量を考慮すると、ULOFにおいても炉心の幾何形状が維持できる可能性があることが示された。一方、図 18の炉容器内各領域における鉛冷却材の平均温度の時間変化に示すように、上部プレナム内の鉛の温度は 950 K まで上昇しており、この高温の鉛に対する炉容器健全性と冷却系の除熱能力の確保が事故の炉内格納が成立するために必要となる。

4. 考察

4.1 鉛冷却 MOX 炉における炉心崩壊事故の特徴

2章においても述べたように、鉛冷却炉の炉心崩壊事故における事象推移を特徴づけているのは、冷却材の高い沸点と密度である。冷却材の沸点が構造材の融点よりも高いことから、炉心崩壊事故の初期の過程でナトリウム冷却炉のような冷却材沸騰による正のボイド反応度が印加されることはないが、被覆管の溶融浮上とガスプレナムからのFPガスの放出によるボイド反応度の印加が生じる。なお、典型的なナトリウム冷却炉では全炉心のボイド反応度は約6\$程度となるように設計されるが、解析対象とした鉛冷却炉では全炉心ボイド反応度は同程度の約7\$である。ケース2及びケース3の解析結果からFPガス放出によるボイド反応度印加は、被覆管の破損が炉心の上部で生じることとFPガス気泡が主に炉心の上方向に拡大するために中性子の漏れの効果が大きくなり、FPガス放出による反応度印加によって厳しい再臨界が駆動されることのないことが確認できた。

FPガスの放出に続いて被覆管の溶融と浮上によって反応度が印加される。この被覆管の溶融移動による反応度挿入率は1.0\$/s以下であるため、これによって厳しい再臨界が駆動されることはないが、被覆管反応度の挿入に伴う炉出力の上昇の結果、鉛冷却材が沸騰することでボイド反応度が印加される場合もある。ただし、冷却材中に分散している燃料も燃料と鉛の密度がほぼ等しいことから鉛の蒸気泡の拡大によって冷却材と一緒に炉心中心から炉心上下境界へ移動するため、反応度印加率は10\$/s程度に緩和され、厳しい再臨界が駆動されることはない。

なお、ケース1において炉心内で被覆管が溶融を始めた時点(77.5s)では、炉心上方の上部ガスプレナム領域の被覆管と鉛冷却材の温度は約1400Kと被覆管の融点以下であり、溶融したスティールが流入すると再固化して閉塞を形成する可能性も考えられる。本ケースではスティールの浮上とともに、炉心部の高温の鉛が同時に流入して、スティールは固化することなく上部プレナム領域へ浮上していく結果となった。しかし、上部軸プランケット等の比較的低温で熱容量の大きな領域が存在する炉心では、その領域でスティールが固化して閉塞を形成する可能性もあり、炉心の設計によっては今後の検討課題として残る。

事故初期のFPガス放出と被覆管の溶融浮上による出力変動が収まった後の事象推移は、単相の冷却材中に分散した燃料固体粒子の挙動によって支配される。ケース1では、燃料の冷却材中の重力沈降による出力上昇によって冷却材が沸騰し、その後の冷却材の流動による燃料集中に駆動されて厳しい再臨界が生じている。このような再臨界の発生を回避するための方策として、冷却材流れによる崩壊燃料の上部プレナムへの流出が考えられる。付録4のように燃料粒子の鉛冷却材中の終端速度を概算すると、未破損の燃料ペレット

に相当する直径 8 mm の燃料粒子の場合、独立した燃料粒子に対して 0.46 m/s、燃料粒子の体積率が 30% の場合は 0.35 m/s 等となる。従って、被覆管が溶融喪失して炉心が崩壊した後に、冷却材の上向きの流速として約 0.5 m/s を確保でき、かつ炉心の上方向に燃料流出を妨げるような構造材が存在しなければ、燃料粒子の沈降による再臨界の発生を防ぐことができるといえる。重金属冷却炉では伝熱高低差を大きく取ることで自然対流ヘッドによってある程度の流量を確保することが可能であり、本解析の対象とした BREST-300 をベースとした鉛冷却 MOX 炉においても、定格出力の 40%程度の出力で健全炉心に対して約 0.6 m/s の流速が確保されている。また、重金属冷却炉では自然循環のみで炉心冷却を行う設計も可能であり、炉心崩壊事故において燃料を上部プレナムへ移行できるだけの冷却材流量を確保できる可能性は高い。しかしながら、自然循環流量はプラントの設計と炉心損傷事故の事象推移に依存するため、崩壊炉心における再臨界発生の可能性を判断するには、設計と事故の起因事象について個別に評価と検討を行う必要がある。

また、重金属冷却炉では、高い自然対流能力を活用して、ULOF 発生時にも炉心の健全性を保つことができる可能性を有する。本解析のケース 3 はそのような可能性を示した例であるが、今後は本解析では考慮していない被覆管の高温化に伴うクリープ変形による冷却材流路の狭隘化の影響を考慮した解析が必要である。また、冷却材の沸点が構造材の融点よりも高いために、高温化した冷却材に対する炉容器内構造物および炉容器の健全性の確保が事故影響の炉内格納が成立するために重要となる。例えば、自然対流によって炉心の幾何学的形状が保持されているケース 3 では、上部プレナム温度は 950 K に達しており、この温度が直接炉容器や一次系機器に伝えられるとその機械的健全性を確保することが困難となる温度条件である。また、このような高温の鉛冷却材に対して除熱能力を維持できることも事故影響の炉内格納成立に必要である。

4.2 鉛冷却 MOX 炉における再臨界回避方策

これまで、ナトリウム冷却炉においては、内部ダクト付き集合体、ABLE 集合体などの炉心損傷事故時に厳しい再臨界を回避する設計対応策が提案されてきている。これらの方策は溶融した燃料と冷却材であるナトリウムの熱的相互作用 (FCI: Fuel Coolant Interaction) の結果発生するナトリウム蒸気圧によって冷却材を急速にボイド化させて燃料の流出経路を確保するとともに、そのナトリウム蒸気圧を燃料の流出駆動力として活用する概念である。従って、冷却材の沸点が高い重金属冷却高速炉では、これらのナトリウム冷却炉における再臨界回避方策は有効ではないと考えられる。一方、重金属冷却炉では燃料の密度が冷却材の密度に比べてわずかに大きいものの、ほぼ等しい。また、冷却材の沸点は構造材の融点よりも高く、炉心の崩壊は単相冷却在中における被覆管の溶融から開始する。従つ

て、前述のように被覆管が溶融浮上して、炉心の燃料が機械的支持を失った状態で、燃料を上方向に動かすのに必要な冷却材流速（0.5 m/s 以上）が確保されており、かつ炉心上方の構造材が溶融喪失していれば、損傷を開始した燃料集合体から順次、燃料が上部プレナム領域へ排出され、厳しい再臨界を回避することが可能となる。このためには、自然循環能力を確保するために伝熱高低差を大きく取る一方で、炉心の上方向には低温で熱容量の大きな構造材（軸ブランケット、遮蔽体など）を設置しないことが重要である。

4.3 重金属冷却金属燃料炉の炉心崩壊事故に関する考察

重金属冷却金属燃料炉の評価は実施していないが、ここでは今回の鉛冷却 MOX 炉の解析による知見に基づき、定性的な考察を行う。まず、ATWS 事象に対する受動安全性による事象終息では、燃料の熱伝導度が高い点は有利であるが、運転状態から燃料破損までの温度余裕が MOX 燃料に比べて低い点は不利である。従って、Na 冷却炉との比較における得失の結論を得るにはさらに定量的な評価が必要とされる。ANL 型 (U-15%Pu-10%Zr) の燃料では融点が 1250K と冷却材の沸点、及び被覆管の融点よりも低い。金属燃料のナトリウム冷却炉で指摘されているように溶融した燃料がピン内を上方へ向かって移動し、炉心の上方で被覆管との共晶形成によって燃料破損し、冷却材中に燃料が放出された場合、Na 冷却炉では FCI と FP ガス圧によって燃料が分散するが、重金属冷却炉では燃料が急速に冷却されて閉塞を形成する可能性がある。ただし、この溶融燃料のピン内移動によって十分な量の燃料が炉心外へ移動すれば出力低下によって炉心損傷の事象進展が終息する可能性、金属燃料と冷却材との共晶反応によって閉塞形成が緩和される可能性などが考えられる。従って、金属燃料を採用した重金属冷却炉の設計が実用化調査研究における実用化候補として提案される場合は、これらの緩和効果を詳細に検討する必要がある。

炉心出口で閉塞が形成されると、炉心内の温度が急上昇し、燃料の溶融と破損が進行する。燃料の比重は約 15 度と鉛冷却材よりも大きいため、溶融した燃料は冷却材中を炉心下方へ沈降し、炉心入り口の温度が燃料融点よりも低いために、炉心入り口近傍で閉塞を形成すると予想される。燃料の軸ブランケット領域への侵入挙動は、炉心部に残存する FP ガスの圧力に依存するが、燃料の融点以下の重金属冷却材に満たされたピン束流路への侵入であるため、Na 冷却炉に比べると短い侵入長となると予想され、最終的には本解析のケース 1 のような再臨界の発生する可能性が高い。また、沈降する燃料が液体となっている可能性が高いことから、燃料の体積率が 100% となり、反応度レベルが高くなる可能性がある。また、重金属冷却炉共通の課題として、高温化した冷却材に対する炉容器健全性と冷却機能の確保が炉容器内格納の成立性にとって重要である。

炉心における再臨界回避方策に対しては、上述のように炉心上方における燃料の閉塞形

成が MOX 燃料炉に比べて先行して生じ易い点が不利となるが、炉心燃料が損傷する時点ですでに燃料が液体となっており、十分な流動性を得ている点では有利である。

4.4 重金属冷却窒化物燃料炉の炉心崩壊事故に関する考察

ここでは重金属冷却金属窒化物炉について定性的な考察を行う。まず、ATWS 事象に対する受動安全性による事象終息では、燃料の熱伝導度が高いことが MOX 燃料に比べて有利である。炉心損傷事象における事象推移は燃料からの窒素解離が生じなければ、MOX 燃料とほぼ同様になる。重金属冷却炉では、CDA の事象推移は緩慢で燃料が融点に達するのは炉心崩壊が進行した後であり、また燃料が融点に達したとしても周囲の冷却材で容易に冷却されるため、事象推移シナリオに対する窒素解離の影響は小さく、ほぼ MOX 燃料炉と同様のシナリオとなると予想される。ただし、再臨界により高温の溶融燃料が生じた場合には、窒素解離による一次系バウンダリに対する負荷発生（炉容器内圧上昇）の可能性が残る。再臨界回避方策の概念とその成立性は MOX 燃料炉とほぼ同様である。

5. 結論

鉛冷却型高速増殖炉の炉心安全性の特徴を明らかにすることを目的として鉛冷却 MOX 燃料炉の ULOF 事象における CDA 事象進展解析を行い、以下の結論を得た。

鉛冷却材の有する高沸点・高密度のために伝熱高低差を高く取って自然対流能力を高めた設計では、ULOF 時においても自然対流流量によって炉心の冷却能力が確保され、炉心損傷が防止できる可能性がある。ただし、炉心損傷を防止するためには被覆管の温度制限値はクリープ変形の生じない十分に低い温度である必要がある。

鉛冷却炉では、鉛の沸点が燃料被覆管などの構造材の融点よりも高いことから、炉心損傷事故では被覆管の溶融が単相の冷却材中で生じ、溶融した被覆管が浮上して炉心から流出することによるスティール移動反応度の印加、およびガスプレナム内の FP ガスが被覆管の破損孔を通して放出されることによる正のボイド反応度の印加によって出力が上昇し、炉心損傷が進行する。

被覆管の溶融浮上による反応度印加率は数\$/s 以下であるため、これのみによって厳しい再臨界が駆動されることはない。また、被覆管の溶融破損は炉心の上部 1/4 の近辺で発生し、放出された FP ガス気泡は主に上方向に拡大するため、ボイド反応度の印加率は数 \$/s 以下であり、厳しい再臨界が駆動されることはない。

炉心の損傷が進行した状態では、鉛冷却材の沸騰、燃料溶融に伴う燃料ペレット内の FP ガス放出によってボイド反応度が印加される可能性があるが、燃料と冷却材の密度がほぼ等しいために、これらのボイド発生は常に燃料の分散を伴うことになり、直接再臨界を駆動するような反応度挿入挙動とはならない。ただし、ボイド発生に伴う炉心内の冷却材の流動によって燃料が炉心中心に集中するような動きとなる場合に再臨界が発生する可能性がある。

鉛冷却炉では、ナトリウム冷却炉のように冷却材の最高温度が沸点で制限されないため、炉心出力と冷却材流量の履歴によっては構造材の機械的強度が失われるレベルまで温度上昇し得る。従って、事故影響の炉容器内格納性の観点からは、高温化した鉛に対する一次系バウンダリ、炉容器内構造物及び崩壊熱除去機能の健全性維持が重要となる。

重金属冷却金属燃料炉と窒化物燃料炉の炉心安全上の得失についても定性的な検討を行った。金属燃料炉では、溶融した燃料のピン内移動と炉心上方での破損による閉塞形成によって炉心損傷が加速される可能性の有る一方で、燃料のピン内移動による炉心損傷の事象進展が終息する可能性も指摘された。窒化物燃料炉の炉心損傷事故は MOX 燃料炉とほぼ同様の事象推移になると考えられるが、燃料が高温化した場合の窒素解離による一次系

バウンダリに対する負荷発生（炉容器内圧上昇）の可能性がある。

参考文献

- [1] 早船、他「実用化戦略調査研究（FBR プラント） 平成10年度予備調査 幅広い技術選択肢の検討 」、JNC TN9400 99-080、Oct. 1999.
- [2] Adamov, E. O., et al., Conceptual Design of BREST-300 Lead-Cooled Fast Reactor, ARS 94, Vol. 1, 17-21, 1994.
- [3] Tentner A. M., et al., The SAS4A LMFBR Whole Core Accident Analysis Code, Proc. Intl. Mtg. on Fast Reactor Safety, pp.989-998, Knoxville, TN, April 1985.
- [4] Niwa H., Model development of SAS4A and investigation on the initiating phase consequence in LMFRs related with material motion, IAEA/IWGFR Tech. Comm. Mtg. on Material Motion in LMFRs, O-arai, Japan, June, 1994.
- [5] Imke, Niwa, H., et al., Status of the SAS4A-code development for consequences analysis of core disruptive accidents, Proc. of Intl. Topic. Mtg. on Sodium Cooled Fast Reactor Safety (FRS 94), vol.2, p.232, Obninsk, Russia, Oct.3-7, 1994.
- [6] Kondo Sa., et al., Status and Achievement of Assessment Program for SIMMER-III, A Multiphase, Multicomponent Code for LMFR Safety Analysis, Proc. of 8th Intl. Topic. Mtg. on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Kyoto, Japan, Sept.30 —Oct.4, 1997.
- [7] Kondo, Sa., et al., Current Status and Validation of the SIMMER-III LMFR Safety Analysis Code, Proc. of 7th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-7), Tokyo, Japan, April 19-23, 1999.
- [8] Dunn, F., et al, The SAS2A LMFBR Accident-Analysis Computer Code, ANL-8138, Oct. 1974.
- [9] Orlov, L. L., et al., Lead Coolant as a Natural Safety Component, Mtg. on the Concept of Long-Term Nuclear Power Development around Inherent Safety Reactors with New Fuel Cycle, 1999.

表1 鉛冷却 MOX 炉の設計情報 (1)

	Na冷却MOX 18ヶ月炉心	鉛冷却18ヶ月炉心		鉛冷却倍増時間短縮炉心	
		通常圧損炉心	低圧損炉心	通常圧損炉心	低圧損炉心
原子炉熱出力 (MW)	→	700	←	700	←
原子炉電気出力 (MW)	→	300	←	300	←
原子炉出入口温度 (出口/入口)	→	540/420	←	540/420	←
運転サイクル長さ (ヶ月)	→	18	←	12	←
燃料交換バッチ数	→	5	←	5	←
炉心集合体数 (IC/OC)	→	84 30/54	←	84 30/54	←
径プランケット集合体数	→	78	←	78	←
制御棒本数	→	7	←	7	←
炉心高さ (cm)	→	120	←	80	←
炉心等価直径 (cm)	196	216	235	216	235
炉心出力密度 (W/cc) *	~190	~160	~135	~215	~180
軸プラ厚み (上/下; mm)	→	12/100	←	400/400	←
ガスプレナム長 (上/下; mm)	→	298/1275	←	310/975	←
燃料ピン全長 (mm)	→	2975	←	2975	←
ピン本数 (本)	→	271	←	397	←
燃料スミヤ密度 (%TD)	→	82	←	82	←
被覆管内径 (mm)	→	8.5	←	6.9	←
被覆管肉厚 (mm)	→	0.6	←	0.55	←
被覆管外径 (mm)	→	9.7	←	8.0	←
ワイヤ径 (mm)	1.4				
ワイヤ巻きピッチ (mm)	150				
ピン配列ピッチ (mm)	11.5	12.50	13.60	10.30	11.25
P/D	1.186	1.289	1.402	1.288	1.413
ラッパ管内対面間距離 (mm)	186.4	207.0	226.0	207.0	226.0
ラッパ管内厚 (mm)	3	3	3	3	3
集合体間ギャップ (mm)	3	3	3	3	3
集合体配列ピッチ (mm)	195.4	216.0	235.0	216.0	235.0
集合体ピッチ面積 (cm ²)	330.6	404.1	478.3	404.1	478.3
実効燃料体積比 (%)	38.14	31.21	26.37	30.13	25.45
集合体冷却材流量 (kg/sec)	44	407	407	407	407
バンドル部冷却材流速 (m/sec)	5.44	2.29	1.61	2.28	1.61
レイノルズ数	6.8×10^4	9.3×10^4	9.2×10^4	7.8×10^4	7.7×10^4
グリッド圧損* (7段; kg/cm ²)	-	0.79	0.39	0.78	0.39
バンドル部全圧損 (kg/cm ²)	2.76	2.76	1.09	3.20	1.25

*圧損評価

- ・鉛の物性（密度、粘性係数、定圧比熱）の出典は、日本機械学会「伝熱ハンドブック」、93年2月
- ・グリッドはRhombusタイプを想定（グリッドの流路断面に対する投影面積比を0.25）
- ・ペアバンドル部圧損はBlasiusの相関式、グリッド部圧損はRehmeの式において、Cv=6.5と設定

表2 鉛冷却 MOX 炉の設計情報（2）

計算条件および計算結果	18ヶ月炉心			倍増時間短縮炉心		
	鉛冷却炉心		Na冷却炉心	鉛冷却炉心		Na冷却炉心
	通常圧損炉心	低圧損炉心		通常圧損炉心	低圧損炉心	
原子炉熱出力(MW)	700	←	←	←	←	←
運転サイクル長さ(ヶ月)	18	←	←	12	←	←
炉心高さ(cm)	120	←	←	80	—	—
炉心等価直径(cm)	216	235	196	216	235	196
軸プラ厚み(上／下:mm)	12/100	←	←	400/400	←	←
ガスプレナム長(上／下:mm)	298/1275	←	←	310/975	←	←
ピン本数	271	←	←	397	←	←
集合体配列ピッチ(mm)	216	235	195	216	235	195
実効燃料体積比(%)	31.2	28.4	38.1	30.1	25.5	36.7
Pu富化度(内側／外側)	19.04/24.74	21.11/26.83	18.29/23.84	23.79/29.48	26.15/31.83	22.64/28.23
燃焼反応度(%Δk/kk')	3.83	4.20	3.39	4.50	4.80	4.10
最大線出力(W/cm)	363.9	361.7	364	347.2	344.5	338.3
増殖比「平衡末期」(R/B1層の時)	1.1 (1.027)	1.045 (0.978)	1.131 (1.037)	1.217 (1.144)	1.165 (1.088)	1.274 (1.178)
fissile Pu量(t)「平衡末期」	1.821	1.897	1.798	1.468	1.543	1.452
原子炉倍増時間(年)(R/B1層の時)	69.1 (237.9)	227.3 (-)	50.3 (154.8)	27.7 (42.0)	42.4 (79.8)	20.5 (31.0)
高速フルエンス(n/cm ²)	5.21E+23	4.87E+23	4.96E+23	4.53E+23	4.23E+15	4.29E+23
ドッパー係数(Tdk/kk/dt)	3.80E-03		5.69E-03	2.97E-03		4.61E-03
炉心平均燃焼度(MWd/t)	143200	143800	140600	146300	146500	143000

表3 鉛冷却 MOX 燃料炉の設計研究における出力流量設定

径方向列番号	集合体種類	バッチ平均EOC集合体出力(MW)	集合体流量(kg/s)
1	IC1	9.7	505
2	IC2	9.3	484
3	IC3	8.7	453
4	OC1	8.5	443
5	OC2	6.5	338
6	RB1	0.81	42.2
7	RB2	0.24	12.5

表4 SIMMER-III を用いた解析における出力流量設定

径方向 メッシュ番号	内側炉心			外側炉心		径方向ブランケット
	2	3	4	6	7	
1集合体当たりの出力(W)	1.086E+07	1.045E+07	9.325E+06	8.544E+06	5.722E+06	3.457E+05
出力／流量比	1.1236	1.08336	1.05314	0.99793	0.90588	1.0063292
流量(kg/s)	5.909E+02	5.481E+02	4.755E+02	4.128E+02	2.510E+02	1.684E+01

表5 出力流量比の設定

典型的なナトリウム冷却MOX炉のP/F分布							船冷却MOX炉のP/F分布		
CH NO.	S/A数	P	P/F	燃焼度(A%)	バッチ	FPガス 保持率	P/F * S/A 数	S/A数	リング平均 P/F
1	1	1.37	1.15	5.355	1	0.53	1.15	25	1.1236
2	12	1.15	1.13	4.558	1	0.53	13.548		
3	12	1.13	1.12	8.743	2	0.44	13.392		
4	6	1.21	1.09	4.814	1	0.54	6.546	42	1.0833571
5	6	1.29	1.09	14.280	3	0.26	6.52116		
6	6	1.21	1.09	13.443	3	0.29	6.51984		
7	6	1.21	1.09	13.443	3	0.29	6.516		
8	6	1.28	1.08	5.04	1	0.54	6.474		
9	12	1.10	1.08	4.376	1	0.56	12.924		
10	6	1.28	1.08	9.705	2	0.37	6.456	42	1.0531429
11	6	1.09	1.08	8.412	2	0.46	6.45		
12	12	1.18	1.06	9.098	2	0.40	12.744		
13	6	0.90	1.04	3.553	1	0.61	6.258		
14	12	1.02	1.03	4.074	1	0.59	12.324		
15	6	1.14	1.03	12.871	3	0.32	6.156	84	0.9979286
16	12	1.04	1.02	11.866	3	0.38	12.276		
17	6	0.95	1.02	3.794	1	0.60	6.138		
18	12	1.00	1.01	11.426	3	0.38	12.096		
19	12	0.98	0.99	7.627	2	0.50	11.856		
20	12	0.85	0.99	6.532	2	0.59	11.832		
21	12	0.91	0.98	7.083	2	0.57	11.784		
22	12	0.91	0.97	3.62	1	0.62	11.688		
23	6	0.97	0.97	7.553	2	0.51	5.796	102	0.9056824
24	6	0.97	0.97	7.553	2	0.51	5.796		
25	12	0.88	0.95	10.095	3	0.46	11.412		
26	12	0.95	0.95	10.816	3	0.41	11.352		
27	6	0.93	0.94	10.679	3	0.41	5.658		
28	12	0.82	0.93	3.275	1	0.62	11.112		
29	12	0.79	0.92	8.971	3	0.56	11.064		
30	6	0.84	0.91	6.563	2	0.60	5.436		
31	12	0.99	0.89	3.956	1	0.61	10.704		
32	12	0.72	0.81	5.509	2	0.66	9.66		
33	6	0.81	0.74	9.227	3	0.54	4.41		

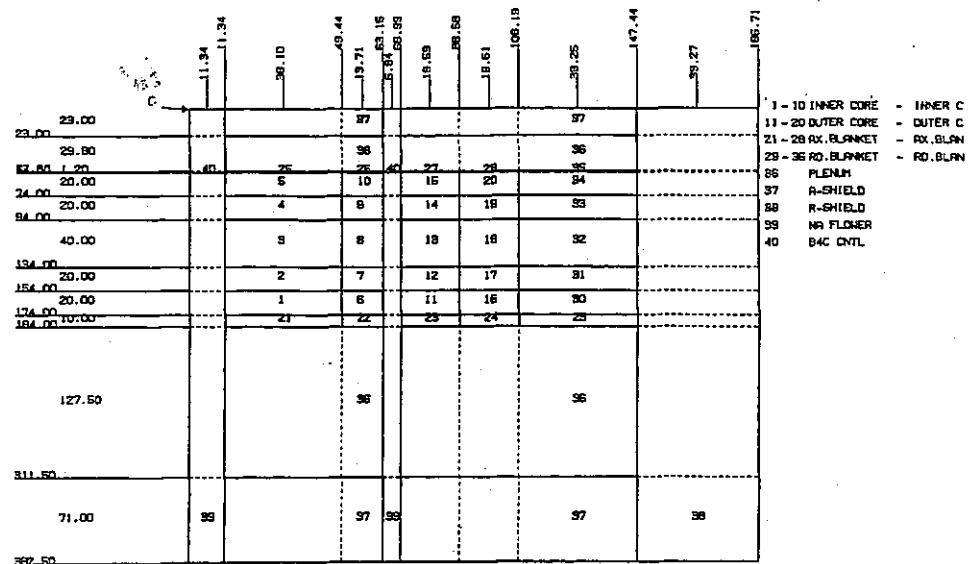


図1 鉛冷却MOX炉の炉心周辺の幾何形状（燃焼計算体系）

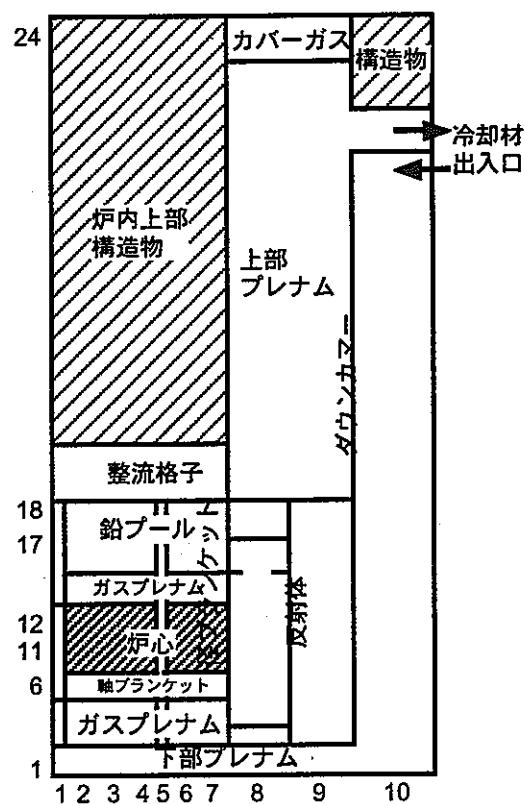


図2 鉛冷却MOX炉解析体系の概念図

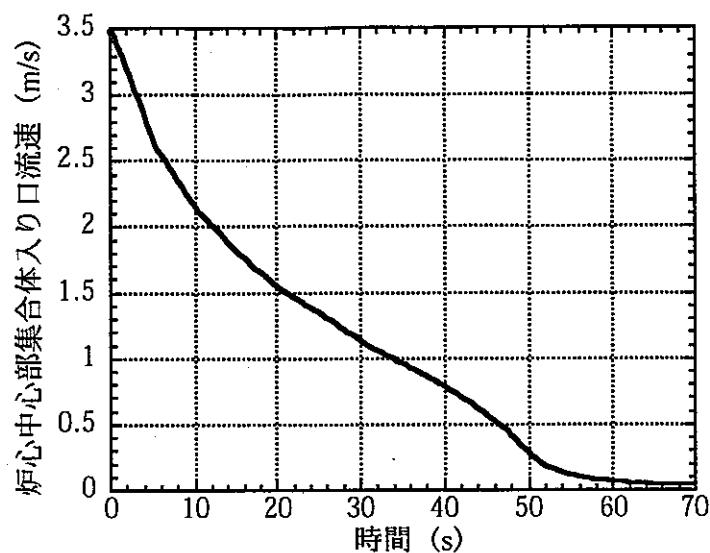


図3 本解析における流量減衰曲線（内側炉心集合体の流速）

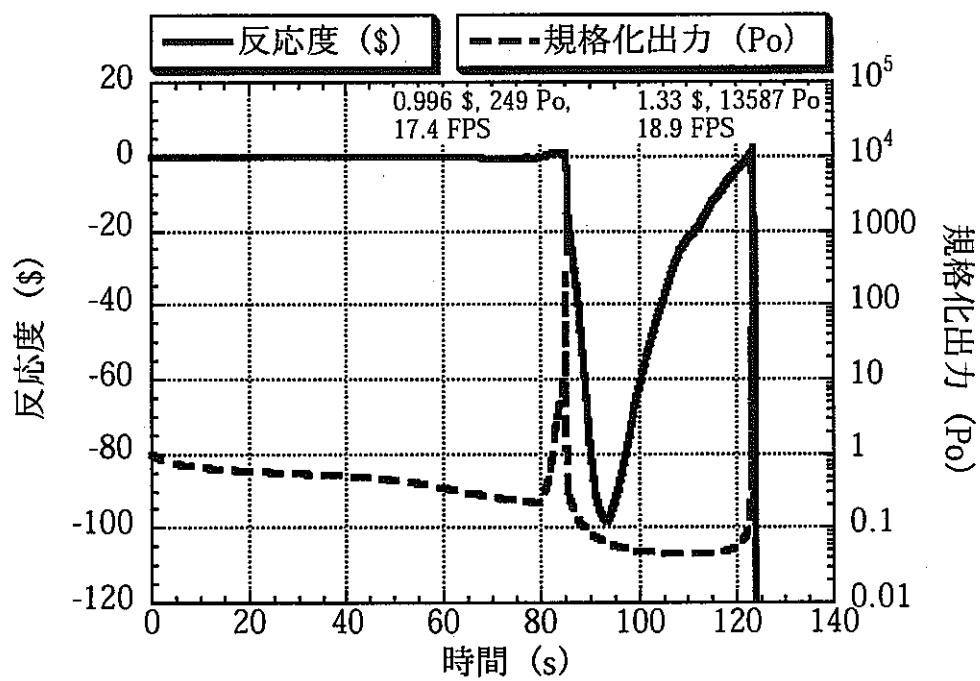


図4 ケース1の出力反応度履歴 (0~125 s)

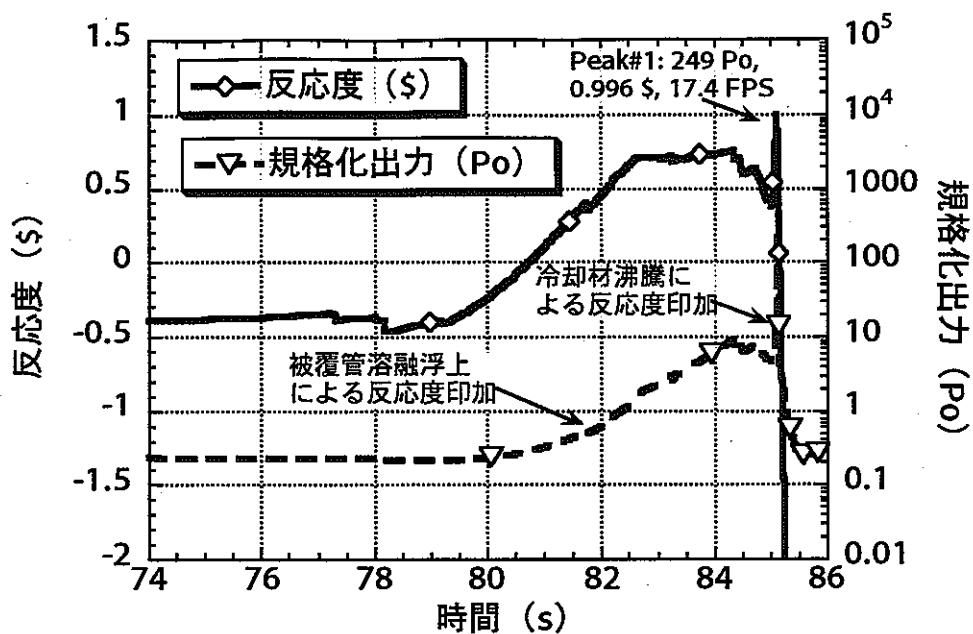


図5 ケース1の出力反応度履歴 (74~86 s)

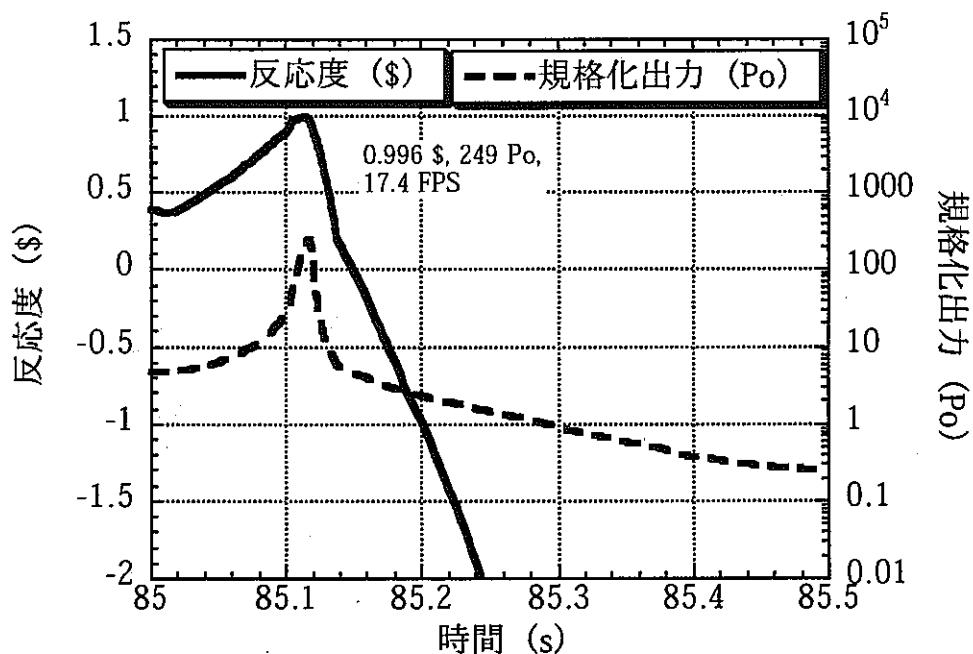


図6 ケース1の出力反応度履歴 (85~85.5 s)

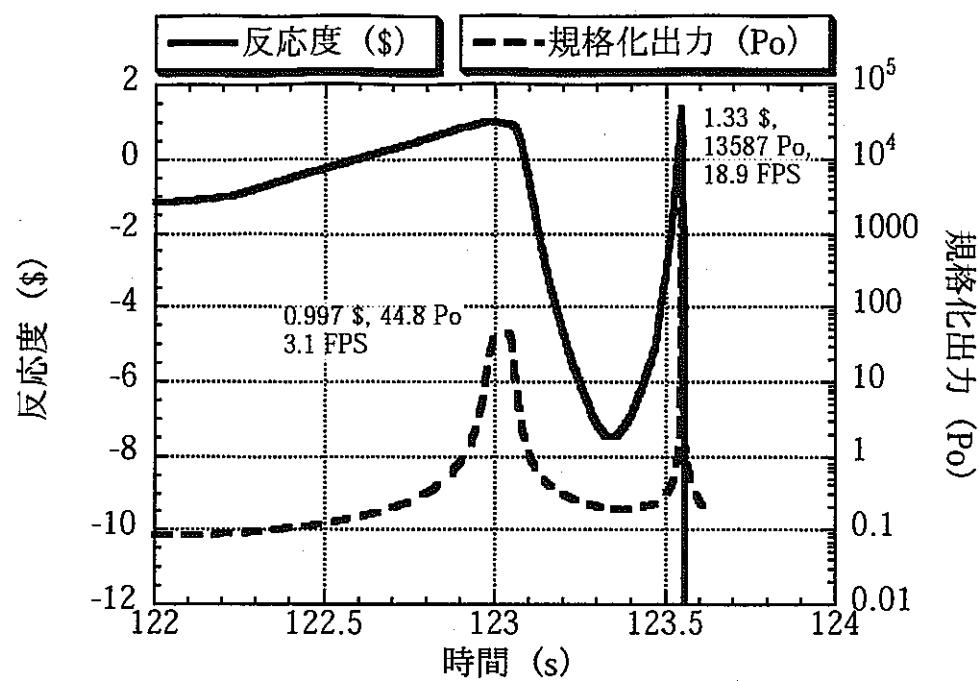


図7 ケース1の出力反応度履歴(122~124 s)

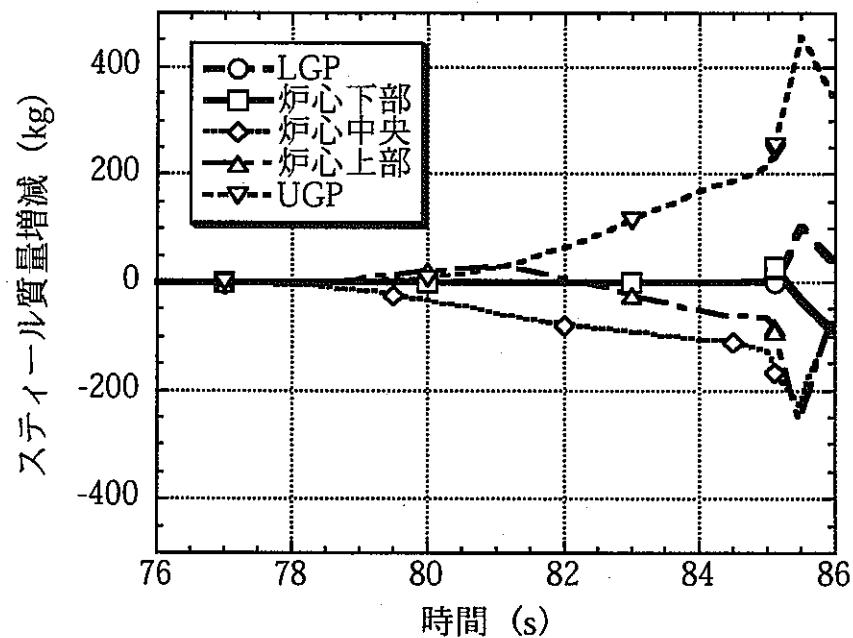


図8 炉心及びその周囲におけるスティール質量変化(ケース1: FPガス放出無し)

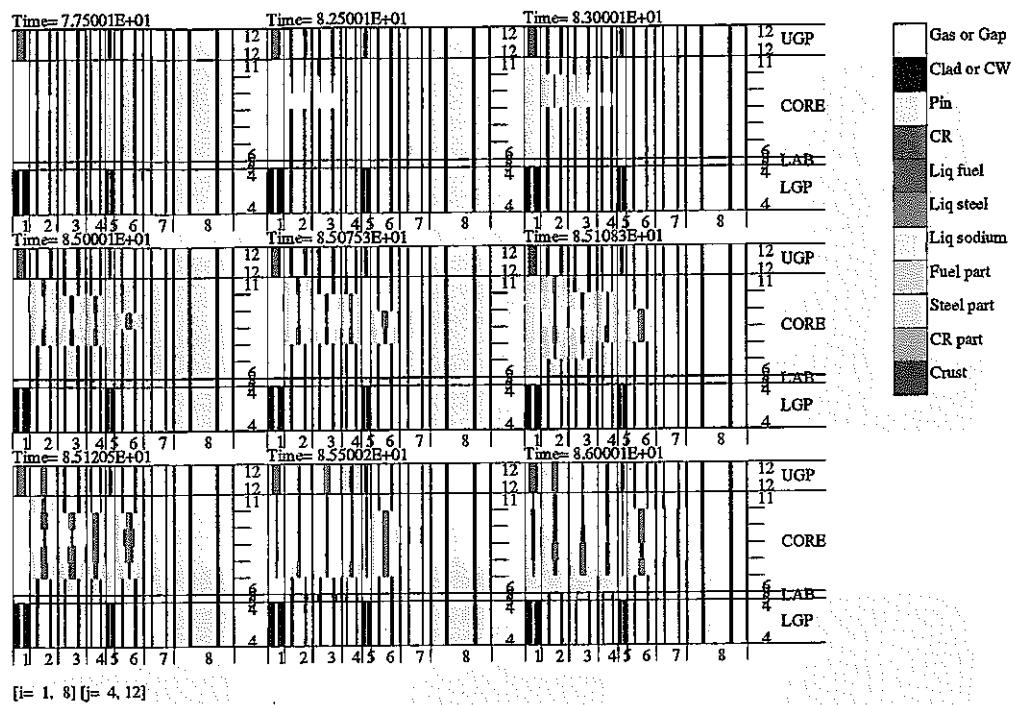


図9 ケース1における炉心近傍での物質分布の変化

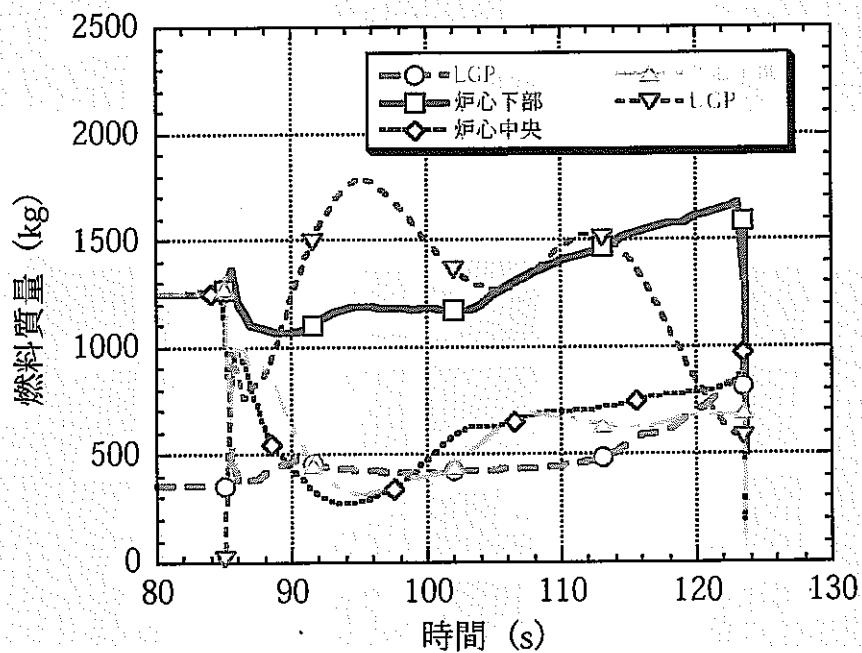


図10 炉心及びその周囲における燃料質量変化（ケース1：FPガス放出無し）

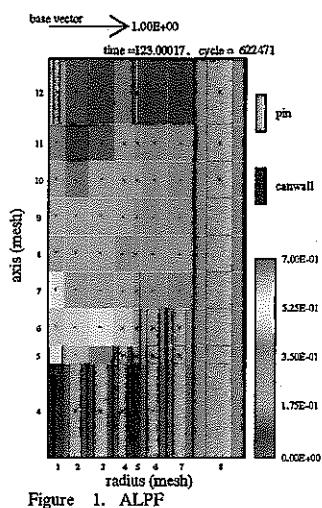


Figure 1. ALPF

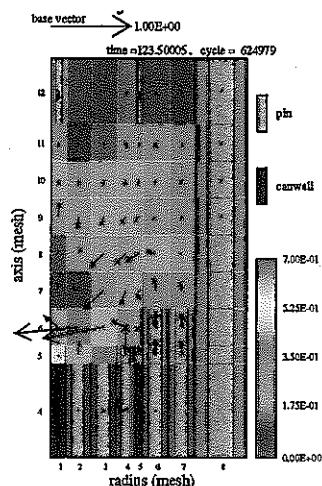


Figure 2. ALPF

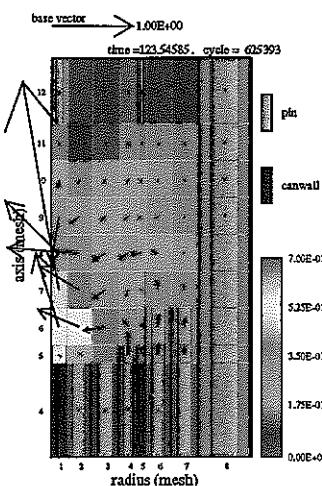


Figure 3. ALPF

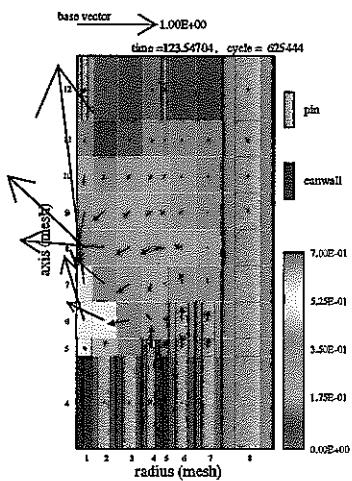


Figure 4. ALPF

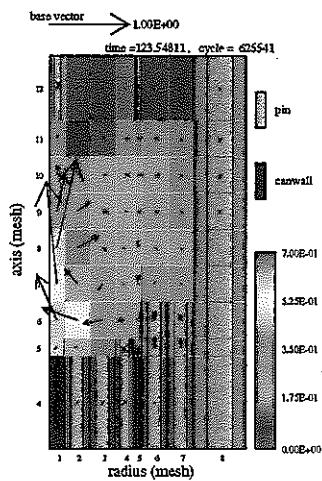


Figure 5. ALPF

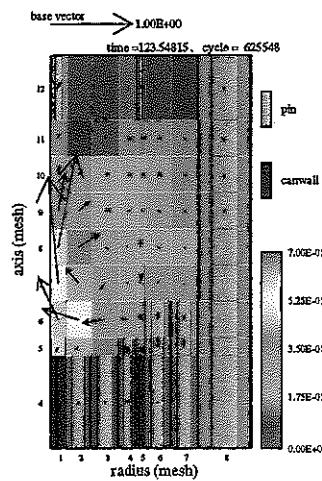


Figure 6. ALPF

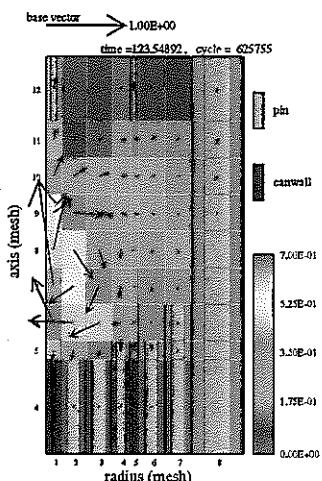


Figure 7. ALPF

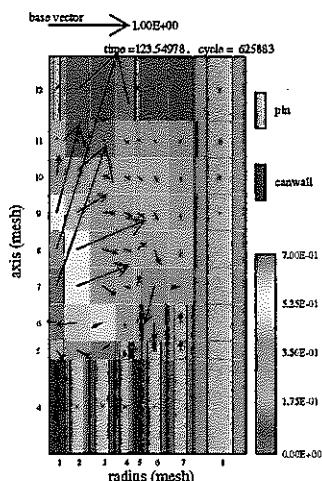


Figure 8. ALPF

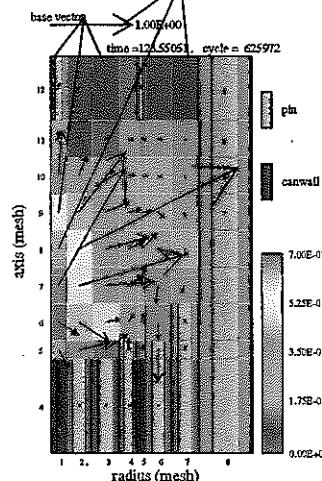


Figure 9. ALPF

図11 炉心近傍での燃料体積率の空間分布と流速（ケース1：F P ガス放出無し）

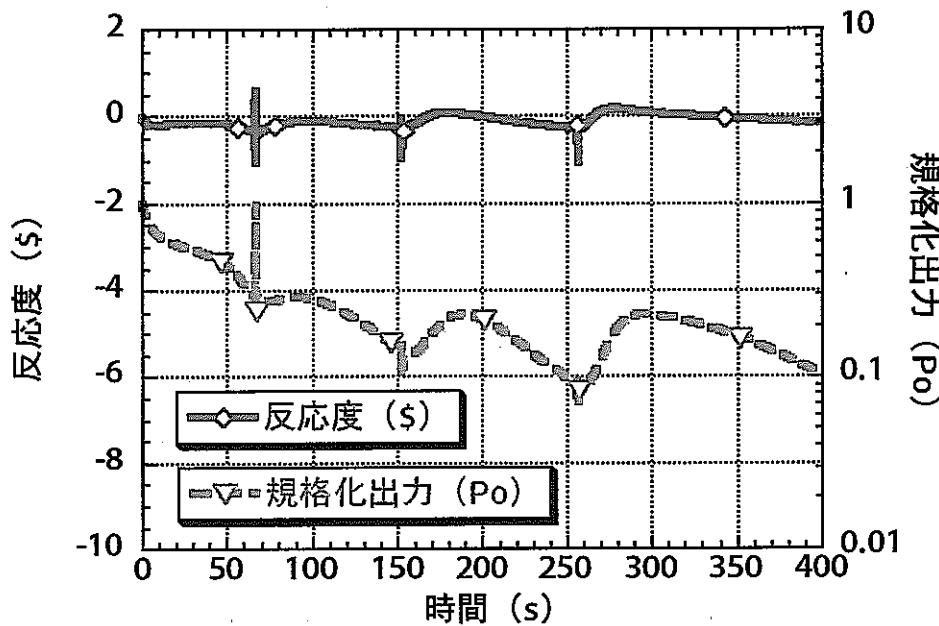


図12 ケース2の出力反応度履歴 (0~400 s)

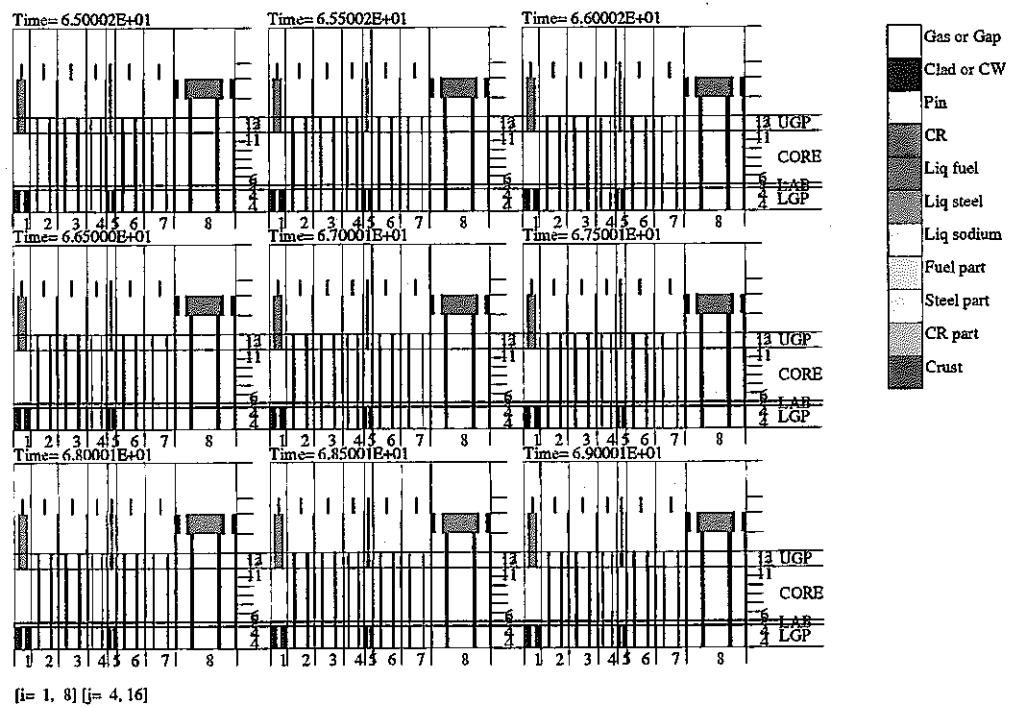


図13 FPガス放出によるボイド拡大挙動 (ケース2)

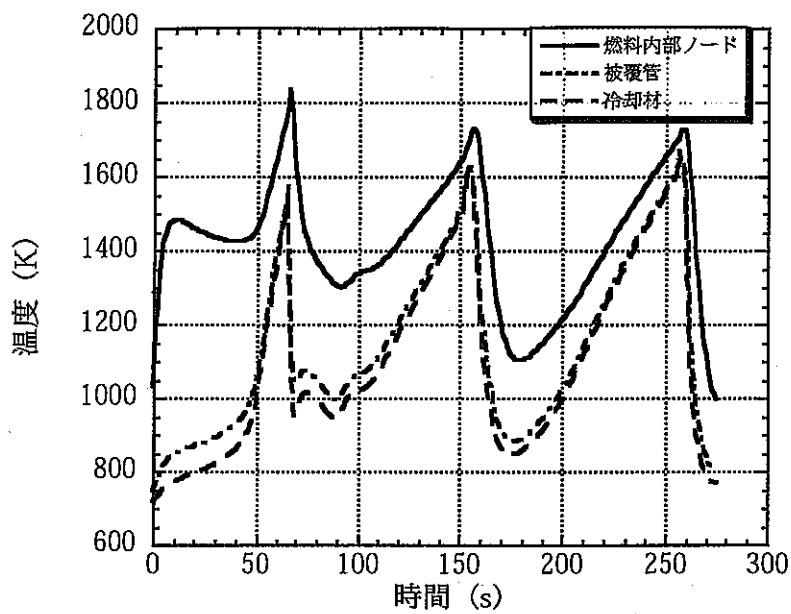


図14 炉心中心部の被覆管温度履歴（ケース2）

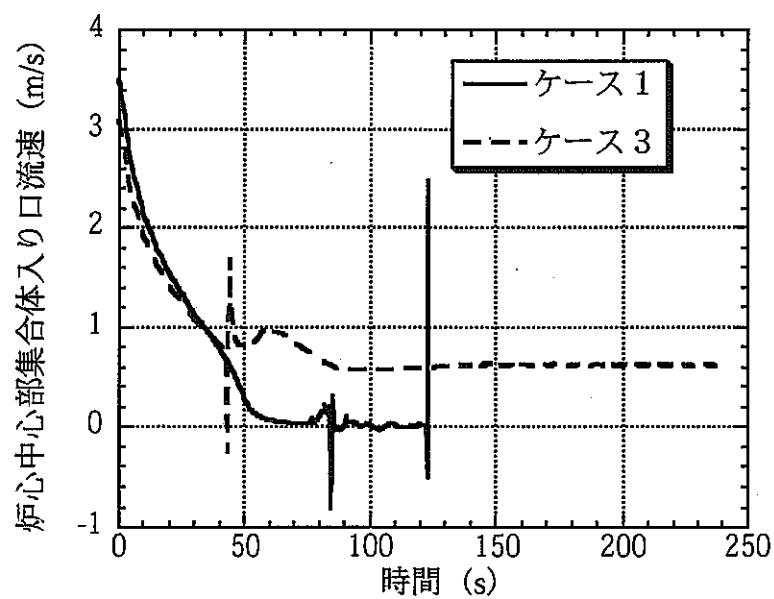


図15 炉心中央部の集合体入口流速

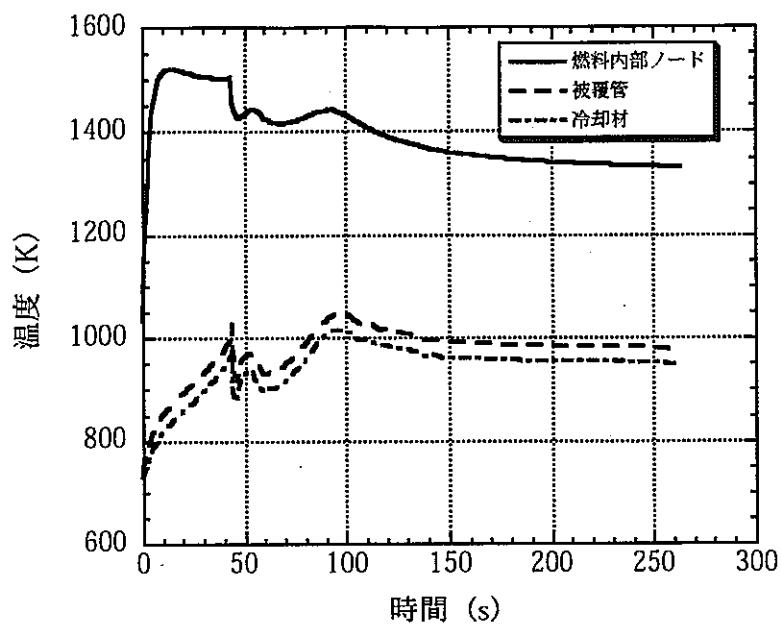


図16 炉心中心部の燃料温度と炉心出口における被覆管・冷却材温度（ケース3）

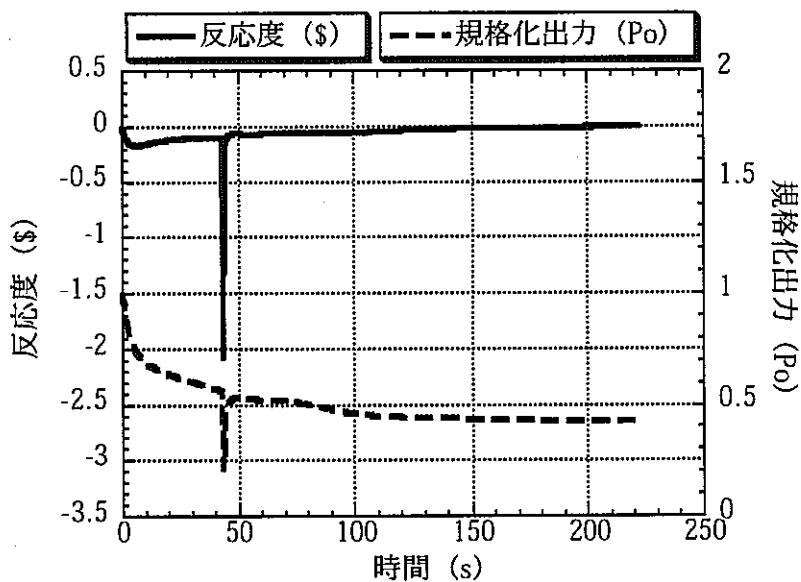


図17 反応度と出力の時間履歴（ケース3）

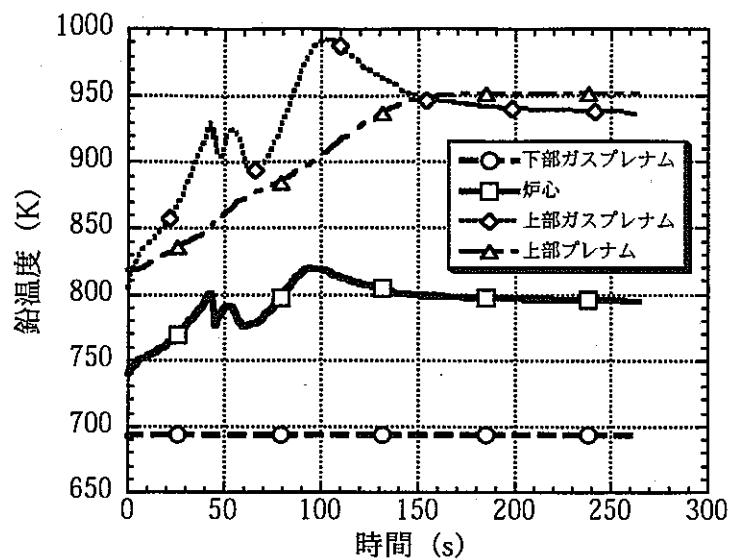


図18 炉容器内の各領域における冷却材温度（ケース3）

付録 1 鉛冷却材と MOX 燃料の密度の比較

従来、Pb-MOX 炉においては、燃料密度が鉛の密度よりも小さく、かつ鉛の沸点がスティールの融点よりも高いために、炉心崩壊事故時には被覆管が溶融した後に燃料ペレットが単相の鉛の中を浮上するとされている。鉛冷却炉では、鉛自体が遮蔽体となるため、Na 冷却炉のように炉心上方に遮蔽体を設置する必要はない。従って、燃料ピン束の上方に広い流路を確保することが可能であり、燃料崩壊時には燃料が浮上することにより炉心から燃料が排出されて厳しい再臨界の可能性が無くなることが期待できる。このため、本メモでは物性値情報を基に、燃料浮上の可能性を確認する。

鉛の密度は文献¹に基づく次のフィッティング式を用いる。

$$\rho = -1.178 \times T + 1.130 \times 10^4 \quad (1-1)$$

ここで、T は温度[K]、適用範囲は 607K～1273K である。被覆管の融点である 1713K は(1-1)式の適用範囲を超えており、液体密度の温度依存特性は臨界点近傍以外では大きく変動しないため、(1)式を 1713K まで外挿して用いる。

固体燃料の理論密度の温度依存性は、Fink²らによって $(U_{0.8}Pu_{0.2})O_{1.98}$ に対して提案されている次式を用いる。

$$\rho = 11006 \times (1.0055 - 1.2498 \times 10^{-5}T - 1.9530 \times 10^{-8}T^2 + 4.2334 \times 10^{-12}T^3) \quad (1-2)$$

なお、Pu 富化度が 20%から 30%に変化すると、燃料密度は僅かに増加するが、その変化量は 1.0%以下であり、以下の鉛との比較においては無視できる。(1-1)式及び(1-2)式をプロットした図を以下に示す。

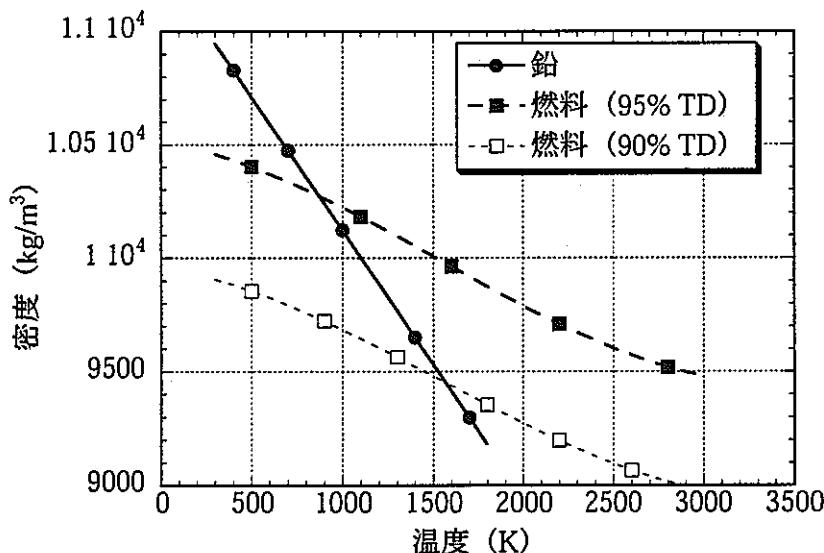


図 1－1 鉛冷却材と MOX 燃料の密度の比較

¹ 日本機械学会、伝熱ハンドブック、1993 年

現在の Pb-MOX 炉の設計条件である 95%TD(中心空孔を除く)の燃料では、温度が 850K 以下では燃料が鉛よりも低密度であるが、構造材の融点 (1713K) 近傍では燃料が鉛よりも高密度となり、燃料は浮上しないことがわかる。燃料崩壊時には燃料の温度は鉛よりも高くなっていると考えられるが、3000K の燃料密度と比較しても、1713K の鉛の密度は小さい。

結論として、従来 Pb-MOX 炉では燃料崩壊時に浮力によって燃料が単相の鉛の中を浮上するとされていたが、実際には温度上昇に伴う密度変化を考慮すると燃料崩壊時に燃料の密度が鉛の密度を上回り、燃料は沈降すると考えられる。ただし、燃料の密度と鉛の密度の違いは約 6.7%程度であることから単相鉛冷却材中における沈降挙動は緩慢なものとなり、また冷却材の流れがある場合には容易に冷却材とともに流動する。

² J.K. Fink et al., Properties for Reactor Safety Analysis, ANL-CEN-RSD-82-2 (1982).

付録2 SIMMER-IIIへのFPガス放出モデルの組み込み

鉛冷却炉における主要な反応印加要因の一つであるガスプレナムからのFPガス放出によるボイド反応度印加を解析において考慮するために、SAS4Aのプレナムガス放出モデルPIPFLO^[2-1]をSIMMER-IIIへ移植した。SAS4Aでは上下一方のガスプレナムからのガス放出をモデル化しているが、SIMMER-IIIへ移植する際に両方のガスプレナムからの放出を扱えるようにモデルを改良した。以下にPIPFLOモデルのSIMMER-IIIへの組み込み方法について述べる。

SIMMER-IIIへのPIPFLOの組み込みでは、オリジナルのPIPFLOには全く変更を加えずに使用する。これはすでに使用実績のあるSAS4Aコードのモデルの信頼性を活用できる利点があることと、将来SAS4Aのモデルが改良された場合にSIMMER-III側にも反映が容易となるためである。PIPFLOモデルは以下のサブルーチンを呼び出すことで、プレナムガスからのガス放出量を求める。

```
CALL PIPFLO(PJGB, PKGB, TTGB, XLGB, DHGB, RJGB, GAMGB, U0GB, T0GB,
AFRGB, BFRGB, V1GB, G1GB, T2GB, TYGB, ICHOKE)
```

ここで、各引数の意味は以下の通りとなる。PJGB：ガスプレナムの圧力[atm]、PKGB：被覆管破損位置の圧力[atm]、TTGB：ガスプレナムの温度[K]、TYGB：被覆管破損位置でのガス温度[K]、XLGB：ガスプレナムから被覆管破損位置までの距離[cm]、DHGB：ガス放出経路の水力等価直径[cm]、RJGB：気体定数(6.33293E+05[ergs / goK])、GAMGB：比熱比(default = 1.5)、U0GB：ガスの基準粘性係数[poise](at T0 [K])、T0GB：ガスの基準粘性係数を定義した温度[°C]、AFRGB：ガス放出の抵抗係数式の係数(default = 0.1875)、BFRGB：ガス放出の抵抗係数式の係数(default = -0.2)、V1GB：ガスプレナムからのガス流出流速[cm/s]、G1GB：ガスの質量流束[g / cm²s]、T2GB、ICHOKE：作業変数。

従って、ガスプレナムからのガス放出量を求めるには、ガスプレナムと被覆管破損位置におけるガス温度と圧力、破損位置までの距離、水力等価直径をPIPFLOルーチンへ与えることで、ガスの質量流束が得られる。このガスの質量流束から、タイムステップDt内に被覆管破損孔の存在するセルへ放出されるガス質量を求め、放出位置におけるガスの圧力・密度・温度を更新する。この更新は以下の定式化に基づいて行う。ガスプレナムから破損孔セルへセルのガス放出を模式的に示すと図2-1のようになる。

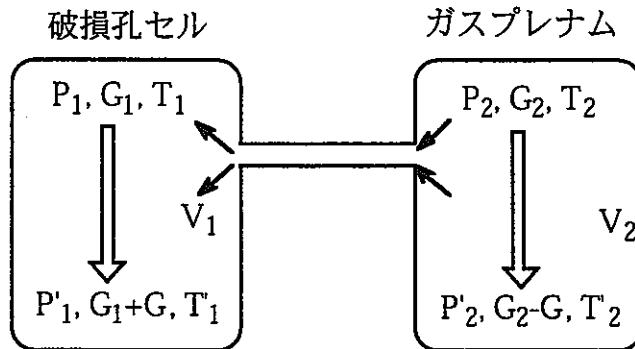


図 2-1 ガスプレナムから破損孔セルへのガスの移行による変化

ここで、P, G, T 及び V はそれぞれ圧力、質量、温度、及び体積である。ガスプレナムから破損孔セルへ質量 G のガスが流出し、ガスプレナムと破損孔セル内のガスの質量がそれぞれ G₂-G, G₁+G と変化した場合、断熱変化と理想気体則を想定すると、ガスプレナム及び破損孔セルの圧力は、それぞれ

$$P'_2 = P_2 \left(1 - \frac{G}{G_2} \right)^{\kappa} \quad (2-1)$$

$$P'_1 = P_1 + \frac{P_2 V_2}{V_1} \left[1 - \left(1 - \frac{G}{G_2} \right)^{\kappa} \right] \quad (2-2)$$

で与えられる。ガス流出後のそれぞれの領域のガス温度もこれらの圧力と理想気体則から求まる。(2-1,2)式では、V₁ は一定であると仮定しているが、実際には破損孔セルの圧力が FP ガス放出によって上昇し、これによって V₁ も増加すると考えられる。すなわち、実際には V₁ は一定ではなく、圧力 P₁ の上昇に伴って増加するが、SIMMER-III の数値流体アルゴリズムでは、圧力変化によるガス体積の更新は陽的に行われることから、圧力 P₁ がオーバーシュートする可能性がある。また、FP ガス放出初期では単相の流路中にガスが放出されることになるが、そのような場合、破損孔セルにおけるガスの体積 V₁ は極めて小さい。これらの要因のため、PIPFLO モデルで計算される質量移行量 G をそのまま当てはめると、P₁ が P₂ よりも大きくなる可能性が高く、FP ガス放出モデルでは、P₁ が P₂ 以下となるように G に制限を加える。本モデルの CS 及び AF を次ページ以後に示す。

[2-1] Dunn, F., et al, The SAS2A LMFBR Accident-Analysis Computer Code, ANL-8138, Oct. 1974.

```

*CD FFPL
*/
COMMON/FFPL/
*      DEGLS (IBM), DHGUS (IBM), VOLGPL(IBM), VCLGPU(IBM)
*, SALGFL(IBM), SALGFLU(IBM), RGFL (IBM), RGFU (IBM)
COMMON/FFPL/ LSPFFL
COMMON /FFPL2/ FLRUPT(MMS)

*DK INIFPG
/*
   SUBROUTINE INIFPG
C
C
*CA IMPDBL
*CA DIMEN
*CA CONST
*CA INPUT
*CA MESHD
*CA CELMK
*CA UNITS
*CA PININ
*CA FFPL
C
C   PREPARATION FOR FPG CALCULATION
C
DO 100 I = 1, IB
  IF(JGPL1(I).NE.0.AND.JGPL2(I).NE.0) THEN
    IJ = IBP2*JGPL2(I)+I-1
    IF(ALPSK(IJ+IBP2,4).LE.ZERO) THEN
      JGPL1(I) = 0
      GO TO 120
    ENDIF
    DZFFL = ZERO
    DO 110 J = JGPL1(I),JGPL2(I)
      DZFFL = DZFFL + DZINP(J)
  110 CONTINUE
  VOLGPL(I) = ALPNFK(IJ+IBP2,1)*DZFFL
  RINL = (ALPNFK(IJ+IBP2,1)+ALPINK(IJ+IBP2)+ALPSK(IJ+IBP2,1)
*      /(ALPNFK(IJ+IBP2,1)+ALPINK(IJ+IBP2)+ALPSK(IJ+IBP2,1)
*      +ALPSK(IJ+IBP2,4)) * RPINI(IJ+IBP2)
  DHGUS(I) = AGLS/(PI*RINL)
  SALGFL(I) = (ALPNFK(IJ+IBP2,1)+ALPINK(IJ+IBP2)+ALPSK(IJ+IBP2,1)
*      +ALPSK(IJ+IBP2,4)) * AGLS/(PI*RPINI(IJ+IBP2)**TWO)
  RGPL(I) = PGPL(I)/RGJB*C1E4/TGPL(I)
  ENDIF
C
  WRITE(OUTFU,'(1H /1H ,80("-"))')
  WRITE(OUTFU,'(1H ,I =",I3)') I
  WRITE(OUTFU,1000)
  100 'AGLS =',AGLS, 'DZFFL =',DZFFL, 'VOLGPL =',VOLGPL(I),
  'RINL =',RINL, 'SALGFL =',SALGFL(I), 'DHGUS =',DHGUS(I),
  'RGPL =',RGPL(I), 'PGPL =',PGPL(I), 'TGPL =',TGPL(I)
C
  120 CONTINUE
C
  IF(JGPU1(I).NE.0.AND.JGPU2(I).NE.0) THEN
    IJ = IBP2*JGPU1(I)+I-1
    IF(ALPSK(IJ+IBP2,4).LE.ZERO) THEN
      JGPU2(I) = 0
      GO TO 140
    ENDIF
    DZFFU = ZERO
    DO 130 J = JGPU1(I),JGPU2(I)
      DZFFU = DZFFU + DZINP(J)
  130 CONTINUE
  VOLGPU(I) = ALPNFK(IJ,1)*DZFFU
  RINU = (ALPNFK(IJ-IBP2,1)+ALPINK(IJ-IBP2)+ALPSK(IJ-IBP2,1)
*      /(ALPNFK(IJ-IBP2,1)+ALPINK(IJ-IBP2)+ALPSK(IJ-IBP2,1)
*      +ALPSK(IJ-IBP2,4)) * RPINI(IJ-IBP2)
  DHGUS(I) = AGLS/(PI*RINU)
  SALGFL(I) = (ALPNFK(IJ-IBP2,1)+ALPINK(IJ-IBP2)+ALPSK(IJ-IBP2,1)
*      +ALPSK(IJ-IBP2,4)) * AGLS/(PI*RPINI(IJ-IBP2)**TWO)
  RGPU(I) = PGPU(I)/RGJB*C1E4/TGPU(I)
C
  WRITE(OUTFU,'(1H /1H ,80("-"))')
  WRITE(OUTFU,'(1H ,I =",I3)') I
  WRITE(OUTFU,1000)
  100 'AGLS =',AGLS, 'DZFFU =',DZFFU, 'VOLGPU =',VOLGPU(I),
  'RINU =',RINU, 'SALGFL =',SALGFL(I), 'DHGUS =',DHGUS(I),
  'RGPU =',RGPU(I), 'PGPU(I)', 'TGPU =',TGPU(I)
C
  ENDIF
  140 CONTINUE
  100 CONTINUE
C
  DO 200 N = 1, MMS
    FLRUPT(N) = ZERO
  200 CONTINUE
C
  WRITE(OUTFU,'(1H ,80("-"))/1H ')
  1000 FORMAT(1H ,1P,A10,E12.5,"",A10,E12.5,"",A10,E12.5)
C
  RETURN
END

*DK FFGFLW
SUBROUTINE FFGFLW
C
C   A ROUTINE TO CALCULATE THE FISSION GAS BLOW OUT FROM THE
C   UPPER/LOWER GAS PLENUM
C
*CA IMPDBL
*CA DIMEN
*CA CONST
*CA INPUT
*CA MESHD
*CA TIME
*CA CELMK
*CA PININ
*CA FFPL
*CA EOSREG
*CA EOSPRU
C
C   --- ASSIGNMENT OF MATERIAL NUMBER
C
M1=MTAB(MECTAB(1,3),3)
M2=MTAB(MECTAB(2,3),3)
M3=MTAB(MECTAB(3,3),3)
M4=MTAB(MECTAB(4,3),3)
M=MTAB(MECTAB(4,1),1)
C
C   --- COEFFICIENTS FOR UNIT CONVERSION
ATOPA = 1.01325E+05
PDEC = ATOPA*TEN
C
C   DO 200 I = 1, IB
C
C   -----
C   ----- LOWER FP GAS PLENUM -----
C
C   IF(JGPL1(I).NE.0.AND.JGPL2(I).NE.0) THEN
C
C   --- FIND THE CELL LOCATION OF CLADDING RUPTURE
XLGB1 = ZERO
IF(JGPL1(I).EQ.0) THEN
  JJJ = JBP2
ELSE
  JJJ = JGPUI(I)
ENDIF
DO 210 J = JGPL2(I)+1,JJJ
  IJ = IBP2*I+J-1
  TCFAIL = TLIQUS(REGTAB(IJ,M),M)-TMFAIL
  IF(ALPSK(IJ,4).LE.SMALL .OR.
  TCFAIL(GT.0) .OR. FLRUPT(IJ).GT.ZERO ) THEN
    FLRUPT(IJ) = ONE
    GO TO 220
  ELSE
    XLGB1 = XLGB1 + DZINP(J)
  ENDIF
  210 CONTINUE
  GO TO 230
  220 CONTINUE
  XLGB1 = MAX(XLGB1, C1M2 )
C
C   ----- PIPEFL0 CALCULATION
  IF ( PK(IJ).GT.PGPL(I) ) GOTO 230
  DPGB = PGPL(I) - PK(IJ)
  PKGB = PK(IJ)/ATOPA
C
  RJ = RGJB*C1M4
  P1 = PK(IJ)
  P2 = PGPL(I)
  T1 = TGK(IJ)
  T2 = TGPL(I)
  V1 = ALPGEK(IJ)*DZC(IJ)
  V2 = VOLGPL(I)
  G1 = RBGK(IJ,5)*DZC(IJ)
  G2 = RGPL(I)*VOLGPL(I)
C
  225 CONTINUE
C
  PJGB = PGPL(I)/ATOPA
  TTGB = TGPL(I)
  TYGB = TGK(IJ)
  XLGB = XLGB1*C1E2
  DRGB1 = DRGB/C1E2
  RRGB1 = RGJB/PDEC
  CALL FFFL0(PJGB,PKGB,TTGB,XLGB,DHGB1,RJGB1,GAMGB,UOGB,
  *          TOGB,AFRGB,BFRGB,V1GB,G1GB,T2GB,TYGB,ICHOKE)
  G1GB = TEN*G1GB
C
  GM = G1GB*SALGFL(I)*DT
  FGK = (ONE - (ONE - GM/G2)**GAMGB)
  PID = PI + P2*V2*FGK/V1
C
  IF ( PID.GT.P2 ) THEN
    DRGB = DPGB*CP5
    PGB1 = PGPL(I) - DPGB
    PKGB = PGB1/ATOPA
    GOTO 225
  ENDIF
  IF(G1GB.LE.ZERO) GO TO 230
C
C   ----- UPDATE THE PLENUM GAS CONDITION
  RGNEW = RGPL(I)-(DT*G1GB*SALGFL(I))/VOLGPL(I)
  IF ( RGNEW.LE.ZERO ) RGNEW = RGPL(I)
  PGPL(I)=PGPL(I)*(ONE - GM/G2)**GAMGB
  TGPL(I)=TGPL(I)*(ONE - GM/G2)**(GAMGB-ONE)
  RGPL(I)=RGNEW
C
C   ----- UPDATE THE GAS CONDITION AT THE RUPTURE SITE
  RBGB1 = GM*RDZC(IJ)
  RBGK(IJ,5) = RBGK(IJ,5) + RBGB1
  SVGK(IJ,4) = ALPGEK(IJ)/RBGK(IJ,5)
  TGB1 = (G1*T1 + G2*T2*FGK)/(G1+GM)
  E61 = XEGM1(M1, REGTAB(IJ,M1), TGB1, SVGK(IJ,1))
  E62 = XEGM2(M2, REGTAB(IJ,M2), TGB1, SVGK(IJ,2))
  E63 = XEGM3(M3, REGTAB(IJ,M3), TGB1, SVGK(IJ,3))
  E64 = XEGM4(M4, REGTAB(IJ,M4), TGB1, SVGK(IJ,4))
  RGB = RBGK(IJ,1)+RBGK(IJ,2)+RBGK(IJ,3)
  *      +RBGK(IJ,4)+RBGK(IJ,5)
  SIEGK(IJ) = 1*(RBGK(IJ,1)+RBGK(IJ,2))*E61 + RBGK(IJ,3)*E62
  *      + RBGK(IJ,4)*E63 + RBGK(IJ,5)*E64 / RGB
  CALL ESSPRK(IJ,MMS,IBP2,PK,EPSPK,SIEGK,ABLK,RBCK,ALPGEK
  *          ,TLK,SVLK,ALPLK,TK,SVGK,ASM,ALPGK,REGTAB)
  6
C
  ENDIF
  230 CONTINUE
C
C   -----
C   ----- UPPER FP GAS PLENUM -----
C
C   IF(JGPU1(I).NE.0.AND.JGPU2(I).NE.0) THEN
C
C   --- FIND THE CELL LOCATION OF CLADDING RUPTURE
XLGB1 = ZERO
IF(JGPL2(I).EQ.0) THEN

```

```

      JYL = 1
      ELSE
        JYL = JGPL2(I)
      ENDIF
      DO 310 J = JGPUL(I)-1,JYL,-1
        IJ = IBP2*I+I-1
        TCFFAIL = TLIQUS(RESTAB(IJ,M),M)-TMFAIL
        IF(ALPSK(IJ,4).LE.SMALL .OR.
          4   TSKIJ,4).GT.TCFFAIL .OR. FLRUPU(IJ).GT.ZERO ) THEN
          FLRUPU(IJ) = ONE
          GO TO 320
        ELSE
          XLGB1 = XLGB1 + DZINP(IJ)
        ENDIF
      310  CONTINUE
      GO TO 330
      320  CONTINUE
      XLGB1 = MAX( XLGB1, C1M2 )
C
C ----- PIPFLO CALCULATION
      IF ( PK(IJ).GT.PGPU(I) ) GOTO 330
      DPGB = PGPU(I) - PK(IJ)
      PKB = PK(IJ)/ATOPA
C
      RJ = RJGB*C1M4
      P1 = PK(IJ)
      P2 = PGPU(I)
      T1 = TGK(IJ)
      T2 = TGPU(I)
      V1 = ALPGEK(IJ)*DZC(IJ)
      V2 = VOLGPU(I)
      G1 = RBGK(IJ,5)*DZC(IJ)
      G2 = RGFU(I)*VOLGPU(I)
C
      325  CONTINUE
C
      PJGB = PGPU(I)/ATOPA
      TTGB = TGPU(I)
      TYGB = TGK(IJ)
      XLGB = XLGB1*C1E2
C
      DHGB1 = DHGUS(I)*C1E2
      DHGB1 = DHGB1*C1E2
      RJGB1 = RJGB/PDZC
      CALL PIPFLO(PJGB,PKGB,TTGB,XLGB,DHGB1,RJGB1,GAMGB,UOGB,
                  *      TOGB,AFRGB,BFRGB,V1GB,G1GB,T2GB,TYGB,ICHOK)
      G1GB = TEN*T1GB
C
      GM = G1GB*SALGPU(I)*DT
      FGM = (ONE - (ONE - GM/G2)**GAMGB)
      PID = P1 + P2*V2*FGM/V1
C
      IF ( PID.GT.P2 ) THEN
        DPGB = DPGB*CE5
        PGD1 = PGPU(I) - DPGB
        PGKB = PGD1/ATOPA
        GOTO 325
      ENDIF
      IF(G1GB.LE.ZERO) GO TO 330
C
C ----- UPDATE THE PLENUM GAS CONDITION
      RGENW = RGFU(I)-(DT*G1GB*SALGPU(I))/VOLGPU(I)
      IF( RGENW.LE.ZERO ) RGENW = RGFU(I)
      PGPU(I)=PGPU(I)*(ONE - GM/G2)**GAMGB
      TGPU(I)=TGPU(I)*(ONE - GM/G2)**(GAMGB-ONE)
      RGFU(I)=RGENW
C
C ----- UPDATE THE GAS CONDITION IN RUPTURE POSITION
      RBGB1 = GM*RDZC(IJ)
      RBGK1(IJ,5) = RBGK(IJ,5) + RBGB1
      SVGK(IJ,4) = ALPGEK(IJ)/RBGK(IJ,5)
      TGB1 = (G1*T1 + G2*T2*FGK)/(G1+GM)
      EG1 = XEGM(1,M1, RESTAB(IJ,M1), TGB1, SVGK(IJ,1))
      EG2 = XEGM(2,M2, RESTAB(IJ,M2), TGB1, SVGK(IJ,2))
      EG3 = XEGM(3,M3, RESTAB(IJ,M3), TGB1, SVGK(IJ,3))
      EG4 = XEGM(4,M4, RESTAB(IJ,M4), TGB1, SVGK(IJ,4))
      REG = RBGK(IJ,1)+RBGK(IJ,2)+RBGK(IJ,3)
      *      +RBGK(IJ,4)+RBGK(IJ,5)
      SIEGK(IJ) = ( (RBGK(IJ,1)+RBGK(IJ,2))*EG1 + RBGK(IJ,3)*EG2
      4   + RBGK(IJ,4)*EG3 + RBGK(IJ,5)*EG4 ) / REG
      CALL EOPENK(IJ,MMS,IBP2,PK,EPSEK,SIEGM,IEGM,RSIM,RBK,ALPGK
      4   ,TLK,SVLK,ALPLK,TGK,SVGK,ASM,ALPGK,RESTAB)
C
      ENDIF
      330  CONTINUE
      200 CONTINUE
C
      RETURN
      END
C
C ----- INFPBF SUBROUTINE INFPBF
      *CA IMPDBL
      *CA DIMEN
      *CA CONST
      *CA MESHD
      *CA PARAM
      *CA OPTION
      *CA INPUT
      *CA UNITS
      *CA EDIT
      *CA VNAME
      *CA CELLS
      *CA TIME
C
      CHARACTER*64 B64
      DATA B64/
      /
C
      DIMENSION ENAME(MMS,1)
      EQUIVALENCE ( ALPK(1,1),ENAME(1,1) )
C
      IVBF = IVBF/MAX(IVBF,1)

      WRITE(97) CASEID(1:72)
      WRITE(97) IB, 1
      4   , (REAL(DRIMP(I)),I=1,IB)
      4   , (REAL(DZIMP(J)),J=1,1)
      4   , INT(ONE), IB, INT(ONE), 1
      WRITE(97) 18, 0, IVBF
      WRITE(97)
      4   'RGPL    '//B64
      4   'PGPL    '//B64
      4   'TGPL    '//B64
      4   'XLL     '//B64
      4   'PKL     '//B64
      4   'TVL     '//B64
      4   'RGPU    '//B64
      4   'PGPU    '//B64
      4   'TGPU    '//B64
      4   'XLU     '//B64
      4   'PKU     '//B64
      4   'TVU     '//B64
      4   'DHU     '//B64
      4   'GIU     '//B64
      4   'VIU     '//B64
C
      RETURN
      END

*DK WFPBF
      SUBROUTINE WFPBF
C
C ----- A ROUTINE WHICH OUTPUTS THE BASE FILE.
C   EVERY WORD HAVE A 4 BYTES LENGTH.
C-----
*CA IMPDBL
*CA DIMEN
*CA CONST
*CA MESHD
*CA PARAM
*CA TIME
*CA PININ
*CA FFPL
C
      COMMON /FPSCOM/ XLL, PKL, TVL, DHU, G1L, V1L,
      4   XLU, PKU, TVU, DHU, GIU, VIU
      DIMENSION XLL(IBM), PKL(IBM), TVL(IBM),
      4   DHU(IBM), G1L(IBM), V1L(IBM),
      4   XLU(IBM), PKU(IBM), TVU(IBM),
      4   DHU(IBM), GIU(IBM), VIU(IBM)
C
C -----
      WRITE(97) REAL(T), CYCLE
      WRITE(97) ( REAL( RGPL(I) ), I=1,IB )
      WRITE(97) ( REAL( PGPL(I) ), I=1,IB )
      WRITE(97) ( REAL( TGPL(I) ), I=1,IB )
      WRITE(97) ( REAL( XLL(I) ), I=1,IB )
      WRITE(97) ( REAL( PKL(I) ), I=1,IB )
      WRITE(97) ( REAL( TVL(I) ), I=1,IB )
      WRITE(97) ( REAL( DHU(I) ), I=1,IB )
      WRITE(97) ( REAL( G1L(I) ), I=1,IB )
      WRITE(97) ( REAL( V1L(I) ), I=1,IB )
      WRITE(97) ( REAL( RGPU(I) ), I=1,IB )
      WRITE(97) ( REAL( PGPU(I) ), I=1,IB )
      WRITE(97) ( REAL( TGPU(I) ), I=1,IB )
      WRITE(97) ( REAL( XLU(I) ), I=1,IB )
      WRITE(97) ( REAL( PKU(I) ), I=1,IB )
      WRITE(97) ( REAL( TVU(I) ), I=1,IB )
      WRITE(97) ( REAL( DHU(I) ), I=1,IB )
      WRITE(97) ( REAL( GIU(I) ), I=1,IB )
      WRITE(97) ( REAL( VIU(I) ), I=1,IB )
C
      RETURN
      END

*ID FPGBL
/*
* ADDITION OF INPUT VARIABLES OF COMMON FOR XSTR
*   PGPL(I),I=1,IB, PGPU(I),I=1,IB,
*   TGPL(I),I=1,IB, TGPU(I),I=1,IB,
*   AGLS, TMFAIL, TRUPT
*   RJGB, GAMGB, UOGB, TOGB, AFRGB, BFRGB
*/
/*
* ----- THE FOLLOWING SECTION IS A TEMPORAL REMEDY FOR THE
* ----- FLRUPU TREATMENT IN ORDER TO KEEP THE CONSISTENCY
* ----- OF THE RESTART DUMP.
*/
*I DEFAULT.32
*CA FFPL
*I DEFAULT.34
      DATA FLRUPU /MMS*0.0D0/
/*
* ----- END OF THE SPECIAL TREATMENT.
*/
/*
* PININ FOR COMMON
*/
*I YN979.1
      *      ,JGPL1(IBM),JGPL2(IBM),JGPU1(IBM),JGPU2(IBM)
      *      ,AGLS ,TMFAIL,TRUPT
      *      ,PGPL(IBM),PGPU(IBM),TGPL(IBM),TGPU(IBM)
      *      ,RJGB ,GAMGB ,UOGB ,TOGB ,AFRGS ,BFRGB
      *      ,DHGB
/*
* INILEN
*/
/*
*I INILEN.45
*CA FFPL
*I INILEN.131
      LNFPL = LEN(DHGLS , LSFFFF )
*/
/*
* LENGTH
*/

```

```

/*
*I LENGTH.10
*      ,LNFFFL
*/
/* WRDMP
*/
/*I WRDMP.42
*CA FFPL
*I WRDMP.162
    CALL WRUNF( KDMPPU, DHGLS , LNFFFL, IPRC, IDMODE )
*/
/* RDDMP
*/
/*I RDDMP.49
*CA FFPL
*I RDDMP.175
    CALL RDUNF( DMPPRFU, DHGLS , LNFFFL, IPRC )
*/
/* DUMPA
*/
/* INCNST
*/
*D KTSR8.2
    PARAMETER( NRPFLD=64 )
*/
/* INITIL
*/
/*I INITIL.141
    CALL INITFPG
*/
/* CONST FOR COMMON
*/
*D CONST.12
    & ,C397M2,C148M1,C524M1,C773M1,C325E1,C1E4
*/
/* INCNST.98
    C1E4      = 1.00000D+04
*I INCNST.273
    C1E4      = 1.00000E+04
*/
/* RDINP FOR NAMELIST
*/
*D YN979.2
    ,JGPL1 ,JGPL2 ,JGPU1 ,JGPU2 ,AGLS ,TMFAIL
    ,TRUFT
    ,PGFL ,PGPU ,TGFL ,TGPU ,RJGB ,GAMGB
    ,UOGB ,TOGB ,AFRGB ,BFRGB ,DHGB
*/
/* DEFULT
*/
/*I YN979.4
    DATA JGPL1,JGPL2      /1BM*0,IBM*0/
    DATA JGPU1,JGPU2      /1BM*0,IBM*0/
    DATA PGFL,PGPU       /IBM*1.0D+07,IBM*1.0D+07/
    DATA TGFL,TGPU        /IBM*1.0D+03,IBM*1.0D+03/
    DATA AGLS             /2.00D-06/
    DATA DHGB             /1.00D-04/
    DATA TMFAIL            /1.50D+02/
    DATA TRUFT             /0.05+00/
    DATA RJGB              /6.33293E+05/
    DATA GAMGB             /1.50D+00/
    DATA UOGB              /6.25E-04/
    DATA TOGB              /726.85/
    DATA AFRGB             /7.915D-02/
    DATA BFRGB             /-2.5E-01/
*D YN979.6
    DATA TCRMIN           /3.000E-04/
    DATA JGPL1,JGPL2      /1BM*0,IBM*0/
    DATA JGPU1,JGPU2      /1BM*0,IBM*0/
    DATA PGFL,PGPU       /IBM*1.0E+07,IBM*1.0E+07/
    DATA TGFL,TGPU        /IBM*1.0E+03,IBM*1.0E+03/
    DATA AGLS             /2.00E-06/
    DATA DHGB             /1.00E-04/
    DATA TMFAIL            /1.50E+02/
    DATA TRUFT             /0.05E+00/
    DATA RJGB              /6.33293E+05/
    DATA GAMGB             /1.50E+00/
    DATA UOGB              /6.25E-04/
    DATA TOGB              /726.85/
    DATA AFRGB             /7.915E-02/
    DATA BFRGB             /-2.5E-01/
*/
/* ADDITION OF MODEL
*/
/*I STRBRK
*/
/*I STRBRK.1349
    CALL FPGFLW
*/
/*I SIIIPR
*/
/*I HS398.4
    OPEN(CONVERT='BIG_ENDIAN',UNIT=97      ,STATUS='UNKNOWN'
          ,FILE='SIMFF',FORM='UNFORMATTED')
*I SIIIPR.76
    OPEN(UNIT=97      ,STATUS='UNKNOWN',FILE='SIMFF',FORM='UNFORMATTED'
)
*/
/*I INITIL.146
    CALL INPFBF
*I SIIIPR.193
    CALL WFPBF
*I SIIIPR.325
    IF ( MOD(CYCLE,10).EQ.1 ) CALL WFPBF

```

付録3 鉛冷却 MOX 炉解析のためのコレクションセット

```

*ID CHUNK
*/
*I STEP1.129
  6 ,ALPINK ,ALPSK ,SALMK ,PK
*I MKF.12
  6 ,ALPINK ,ALPSK ,SALMK ,PK
*I SG4L7.32
  DIMENSION ALPINK(MMS),ALPSK(MMS,*),SALMK(MMS,*),PK(MMS)
  LOGICAL PINREG,CHUNKL,CHUNKB
*I MKF.1942
C
C  CHUNK MODEL
C  -----
IF ( MKFOPT(6).EQ.0 ) THEN
C
DO 12400 LM = 4, 6
DO 12400 NN = 1, NIZC
  N = NIZC(NN)
  HQ = IVEL(LM)
  NA = ICVMET( N, N+IBP2, VK(N,NQ).LT.ZERO )
  ND = ICVMET( N+IBP2, N, VK(N,NQ).LT.ZERO )
  APIND = ALPINK(ND)+ALPSK(ND,1)
  APINA = ALPINK(NA)+ALPSK(NA,1)
  CHUNKL = .FALSE.
  CHUNKB = .FALSE.
C
  IF ( APIND.GT.SMALL ) THEN
    DCHD = CP7*DEK(ND)
  ELSE
    DCHD = DHK(ND)
  ENDIF
  IF ( APINA.GT.SMALL ) THEN
    DCHA = CP7*DHK(NA)
  ELSE
    DCHA = DHK(NA)
  ENDIF
C
  PINREG = APINA.GT.SMALL
C
  --- DIAMETER OF THE PARTICLE IN DONOR CELL
  DLU = SIX*ALPLK(ND,LM)/Z(SALMK(ND,LM))
C
  --- BLOCKAGE BY LARGE CHUNK
  CHUNKL = DLU .GT. 0.71*DCHA
C
  --- BLOCKAGE BY BRIDGE FORMATION
  IF ( DCHA.LT.DCHD - DLU ) THEN
    IF ( PINREG ) THEN
      CHUNKB = DLU .GE. 0.17*DHK(NA)
    ELSE
      CHUNKB = DLU .GE. 0.24*DHK(NA)
    ENDIF
  ELSEIF ( DCHA.LT.DCHD - HALF*DLU ) THEN
    IF ( PINREG ) THEN
      CHUNKB = DLU .GE. 0.35*DHK(NA)
    ELSE
      CHUNKB = DLU .GE. 0.50*DBK(NA)
    ENDIF
  ENDIF
C
  ALPLU = ALPLK(NA,LM)/Z(ONE - ASH(NA))
  IF ( ALPLU.GT.CSM2 .AND. (CHUNKL.OR.CHUNKB) .AND.
    PK(ND) - PK(NA).LE.2.0D+6 ) THEN
    AOSTK(N,NQ) = AOSTK(N,NQ) + CIE12
    BOSTK(N,NQ) = BOSTK(N,NQ) + CIE12
  ENDIF
12400 CONTINUE
C
ENDIF
*ID PB2
*/
/* Correction set to put FF gas into the void space
/* Which is created by cladding breakup.
*/
*I STRBRK.510
C
DO 2210 N = 1,NC2
  IJ = ICEL(N,2)
  ALPL = ALPLK(IJ,1)+ALPLK(IJ,2)+ALPLK(IJ,3)
  6   +ALPLK(IJ,4)+ALPLK(IJ,5)+ALPLK(IJ,6)
  OMALPS = ONE-ASH(IJ)
  ALPGK(IJ) = OMALPS-ALPL
  ALPSK(IJ) = MAX(ALPHB0*OMALPS,ALPGK(IJ)+ALPHB0*ALPL)
  ALPGK(IJ) = CVMGT(-SMALL,ALPGK(IJ),ALPGK(IJ).LE.ZERO)
  XFG = RBGK(IJ,2) / ( RBGK(IJ,1)+RBGK(IJ,2) )
  RBGK(IJ,1) = MAX( SMALL, ALPGK(IJ)/SVGK(IJ,1)*ONE - XFG )
  RBGK(IJ,2) = MAX( SMALL, ALPGK(IJ)/SVGK(IJ,1)*XFG )
  RBGK(IJ,3) = MAX( SMALL, ALPGK(IJ)/SVGK(IJ,2) )
  RBGK(IJ,4) = MAX( SMALL, ALPGK(IJ)/SVGK(IJ,3) )
  RBGK(IJ,5) = MAX( SMALL, ALPGK(IJ)/SVGK(IJ,4) )
  EG1 = XEGM (1, REGTAB(IJ,1), TGK(IJ), SVGK(IJ,1) )
  EG2 = XEGM (2, REGTAB(IJ,2), TGK(IJ), SVGK(IJ,2) )
  EG3 = XEGM (3, REGTAB(IJ,3), TGK(IJ), SVGK(IJ,3) )
  EG4 = XEGM (4, REGTAB(IJ,4), TGK(IJ), SVGK(IJ,4) )
  SIEGK(IJ) = ((RBGK(IJ,1)+RBGK(IJ,2))*EG1+RBGK(IJ,3)*EG2
  6   +RBGK(IJ,4)*EG3+RBGK(IJ,5)*EG4)
  6   /(RBGK(IJ,1)+RBGK(IJ,2)
  6   +RBGK(IJ,3)+RBGK(IJ,4)+RBGK(IJ,5))
2210 CONTINUE
C
*I STRBRK.562
C
DO 2310 N = 1,NC3
  IJ = ICEL(N,3)
  ALPL = ALPLK(IJ,1)+ALPLK(IJ,2)+ALPLK(IJ,3)
  6   +ALPLK(IJ,4)+ALPLK(IJ,5)+ALPLK(IJ,6)
  OMALPS = ONE-ASH(IJ)
  ALPGK(IJ) = OMALPS-ALPL
  ALPSK(IJ) = MAX(ALPHB0*OMALPS,ALPGK(IJ)+ALPHB0*ALPL)
  ALPGK(IJ) = CVMGT(-SMALL,ALPGK(IJ),ALPGK(IJ).LE.ZERO)
  XFG = RBGK(IJ,2) / ( RBGK(IJ,1)+RBGK(IJ,2) )
  RBGK(IJ,1) = MAX( SMALL, ALPGK(IJ)/SVGK(IJ,1)*ONE - XFG )
  RBGK(IJ,2) = MAX( SMALL, ALPGK(IJ)/SVGK(IJ,1)*XFG )
  RBGK(IJ,3) = MAX( SMALL, ALPGK(IJ)/SVGK(IJ,2) )
  RBGK(IJ,4) = MAX( SMALL, ALPGK(IJ)/SVGK(IJ,3) )
  RBGK(IJ,5) = MAX( SMALL, ALPGK(IJ)/SVGK(IJ,4) )
  EG1 = XEGM (1, REGTAB(IJ,1), TGK(IJ), SVGK(IJ,1) )
  EG2 = XEGM (2, REGTAB(IJ,2), TGK(IJ), SVGK(IJ,2) )
  EG3 = XEGM (3, REGTAB(IJ,3), TGK(IJ), SVGK(IJ,3) )
  EG4 = XEGM (4, REGTAB(IJ,4), TGK(IJ), SVGK(IJ,4) )
  SIEGK(IJ) = ((RBGK(IJ,1)+RBGK(IJ,2))*EG1+RBGK(IJ,3)*EG2
  6   +RBGK(IJ,4)*EG3+RBGK(IJ,5)*EG4)
  6   /(RBGK(IJ,1)+RBGK(IJ,2)
  6   +RBGK(IJ,3)+RBGK(IJ,4)+RBGK(IJ,5))
2310 CONTINUE
C
*I STRBRK.562
C
COMMON /CVLCOM/CVLRBF(MMS,MCLRE)
*I WBF.80
  COMMON /CVLCOM/CVLRBF(MMS,MCLRE)
*I WBF.80
  **** MASS FLUX ****
  IF ( SN(I)(1:4).EQ.'CVLR' ) THEN
    READ(SN(I)(5:5),'(II)',ERR=999) K
    IF ( K.LT.1 .OR. K.GT.6 ) GO TO 999
    DO 304 IJ=1,IBP2
      WRK(IJ) = CVLRBF(MMS,K)
    304  CONTINUE
  *IF -DEF,CRAY,1
    WRITE(BFU) ( REAL(WRK(NRC(IJ))), IJ=1,IBJB)
  *IF DEF,CRAY,1
    WRITE(BFU) ( REAL4(WRK(NRC(IJ))), IJ=1,IBJB)
    GO TO 100
  ENDIF
*I STEP4.263
  COMMON /CVLCOM/CVLRBF(MMS,MCLRE)
*I STEP4.276
  DO 20 M=1,MCLRE
  DO 20 N=1,IBP2
    CVLRBF(N,M) = CVLR(N,M)
20  CONTINUE
*ID PBS
*/
/* SPECIAL CORRECTION FOR PB-MOX ANALYSIS
/* NEGLECT THE V/C ITERATION FAILURE IN SINGLE PHASE CELL
/* AND PUT SATURATED SODIUM VAPOR
*/

```

```

*I VCHMT.274
C
C --- SPECIAL TREATMENT FOR THE CASE OF V/C ITERATION FAILURE
C   IN SINGLE PHASE CELLS. REPLACE THE VAPOR WITH SATURATED
C   COOLANT VAPOR.
C
C   M3 = MTAB(MECTAB(3,3),3)
C   M4 = MTAB(MECTAB(4,3),3)
C   NVCX = 0
C   DO 30 N=1,NVC
C     IJ = IVCEL(N)
C
C     IF ( EFRBLK(IJ,1) .LT. C1M2 .AND. EFRBLK(IJ,2) .LT. C1M2 .AND.
C       EFRBLK(IJ,4) .LT. C1M2 .AND. EFRBLK(IJ,5) .LT. C1M2 .AND.
C       ALPGK(IJ) .LT. C1M4 ) THEN
C       IF ( ALPGK(IJ) .LT. C1M4 ) THEN
C         EFRBGK(IJ,1) = SMALL
C         EFRBGK(IJ,2) = SMALL
C         SVGK(IJ,1) = AGEN(IJ)/SMALL
C         SVGK(IJ,2) = AGEN(IJ)/SMALL
C         XRGM(IJ,1) = ZERO
C         XRGM(IJ,2) = ZERO
C
C         TGK(IJ) = TLK(IJ,3)
C         PSATCL = XPLIM2(3,RECTAB(IJ,3),TLK(IJ,3))
C         XVGK(IJ,3) = XVGK(3,RECTAB(IJ,3),TGK(IJ),PSATCL)
C         EFRBGK(IJ,3) = AGEN(IJ)/XVGK(IJ,3)
C
C         EG3 = XEGM(M3,RECTAB(IJ,M3),TGK(IJ),SVGK(IJ,3))
C         EG4 = XEGM(M4,RECTAB(IJ,M4),TGK(IJ),SVGK(IJ,4))
C         SIEOK(IJ) = (EFRBGK(IJ,3)*EG3+EFRBGK(IJ,4)*EG4)
C         SIEOK(IJ) = (EFRBGK(IJ,3)+EFRBGK(IJ,4))
C         ERBOK(IJ) = EFRBGK(IJ,3)*XRGM(IJ,3)+EFRBGK(IJ,4)*XRGM(IJ,4)
C         IF(BMTOPI(51).GE.1) THEN
C           VEDIT(1) = IPHASE(IJ)
C           VEDIT(2) = ICELL(IJ)
C           VEDIT(3) = JCELL(IJ)
C           CALL ERRMSG('VCHMT', 'W', 003,
C             'THE V/C ITERATION FAILURE RECOVERED'
C             // AT "I1"-PHASE CELL ("I3","I3").')
C         ENDIF
C       ELSE
C         NVCX = NVCX + 1
C         IVCEL(NVCX) = IJ
C       ENDIF
C
C 30  CONTINUE
C
C   NVC = NVCX
C   IF ( NVCX.EQ.0 ) GOTO 20000
C
C   * VCHMT.579
C   20000 CONTINUE
C   *ID PB6
C   */
C   /* ERROR CORRECTION FOR SIMMER-III
C   /* SET THE SPECIFIC INTERNAL ENERGY OF THE CLADDING TO ZERO
C   /* AFTER UPDATING THE STEEL PARTICLE ENERGY UPON CLADDING BREAKUP
C   /* DUE TO FUEL DISRUPTION.
C   */
C   *D STRBRK.520
C   *I STRBRK.523
C     SIESK(IJ,4) = EZERO(RECTAB(IJ,2),2)
C   *D STRBRK.535
C   *I STRBRK.543
C     SIESK(IJ,4) = EZERO(RECTAB(IJ,2),2)
C   *ID PBV
C   */
C   *I XVLINDE.28
C     IF( M .EQ. 3 .AND. N .EQ. 2 ) THEN
C       XVLINDE = VLIOUS(N,M)/ELIOUS(N,M)
C       * ( -DL(1,N,M)-X*(TWO*DL(2,N,M)-X*THREE*DL(3,N,M)))
C       * ( ONE+X*(DL(1,N,M)+X*(DL(2,N,M)+X*DL(3,N,M))) )**2
C     ELSE
C   *I XVLINDE.30
C     ENDIF
C   */
C   *I XVLINDE.29
C     IF( M .EQ. 3 .AND. N .EQ. 2 ) THEN
C       XVLINDE = VLIOUS(N,M)
C       * ( ONE+X*(DL(1,N,M)+X*(DL(2,N,M)+X*DL(3,N,M))) )
C     ELSE
C   *I XVLINDE.31
C     ENDIF
C   */
C   *I XVSIM.35
C     IF( M .EQ. 3 .AND. N .EQ. 2 ) THEN
C       XVSIM = VLIOUS(N,M)/(ONE+DL(1,N,M)*(E/ELIOUS(N,M)-ONE))
C     ELSE
C   *I XVSIM.36
C     ENDIF
C   *ID HSCK9
C   */
C   /* ADDITION OF INPUT VARIABLES OF COMMON FOR XSTR
C   */
C   *P GPL1(I),I=1,IB, JGPU1(I),I=1,IB,
C   */
C   *T GPL1(I),I=1,IB, TGPU1(I),I=1,IB,
C   */
C   *A GLS, TMFAIL, TRUPT
C   */
C   *R RJGB, GAMGB, UOGB, TOGB, AFRGB, BFRGB
C   */
C   /* ----- THE FOLLOWING SECTION IS A TEMPORAL REMEDY FOR THE
C   /* ----- FLUPT TREATMENT IN ORDER TO KEEP THE CONSISTENCY
C   /* ----- OF THE RESTART DUMP.
C   */
C   *I DEFAULT.32
C   *CA FFPL
C   *I DEFAULT.34
C     DATA FLIRUPT /MMS*0.000/
C   /* ----- END OF THE SPECIAL TREATMENT.
C   */
C   /* PININ FOR COMMON
C   */
C   *I YN979.1
C     * ,JGPL1(IBM),JGPL2(IBM),JGPU1(IBM),JGPU2(IBM)
C     * ,AGLS ,TMFAIL, TRUPT
C
C   * ,PGPL(IBM),PGPU(IBM),TGPL(IBM),TGPU(IBM)
C   * ,RJGB ,GAMGB ,UOGB ,TOGB ,AFRGB ,BFRGB
C   * ,DHGB
C
C   /* INILEN
C   */
C   *I INILEN.45
C   *CA FFPL
C   *I INILEN.131
C     LNFPFL = LENGTH( DHGLS , LSFPFL )
C
C   /* LENGTH
C   */
C   *I LENGTH.10
C     * ,LNFPFL
C
C   /* WRDMP
C   */
C   *I WRDMP.42
C   *CA FFPL
C   *I WRDMP.162
C     CALL WRUNP( KDMPU , DHGLS , LNFPFL , IPRC , IDMODE )
C
C   /* RDDMP
C   */
C   *I RDDMP.49
C   *CA FFPL
C   *I RDDMP.175
C     CALL RDUNP( DMRFU , DHGLS , LNFPFL , IPRC )
C
C   /* DUMPA
C   */
C   *I KT5R8.2
C     PARAMETER( NRPFLD=64 )
C
C   /* CONST FOR COMMON
C   */
C   *I CONST.12
C     4 ,C397M2,C146M1,C524M1,C773M1,C325E1,C1E4
C
C   /* INCNST
C   */
C   *I INCNST.98
C     C1E4 = 1.00000D+04
C   *I INCNST.273
C     C1E4 = 1.00000E+04
C
C   /* RDINP FOR NAMELIST
C   */
C   *D YN979.2
C     * ,JGPL1 ,JGPL2 ,JGPU1 ,JGPU2 ,AGLS ,TMFAIL
C     * ,TRUPT
C     * ,PGPL ,PGPU ,TGPL ,TPGU ,RJGB ,GAMGB
C     * ,UOGB ,TOGB ,AFRGB ,BFRGB ,DHGB
C
C   /* DEFAULT
C   */
C   *I YN979.4
C     DATA JGPL1,JGPL2 /IBM*0,IBM*0/
C     DATA JGPU1,JGPU2 /IBM*0,IBM*0/
C     DATA PGFL,PGPU /IBM*1.0D+07,IBM*1.0D+07/
C     DATA TGPL,TGPU /IBM*1.0D+03,IBM*1.0D+03/
C     DATA AGLS /2.00D-06/
C     DATA DHGB /1.00D-04/
C     DATA TMFAIL /1.50D+02/
C     DATA TRUPT /0.0D+00/
C     DATA RJGB /6.33293D+05/
C     DATA GAMGB /1.50D+00/
C     DATA UOGB /6.25D-04/
C     DATA TOGB /726.85/
C     DATA AFRGB /7.915D-02/
C     DATA BFRGB /-2.5D-01/
C
C   *D YN979.6
C     DATA TGPMLIN /3.000E-04/
C     DATA JGPFL,JGPFL2 /IBM*0,IBM*0/
C     DATA JGPU1,JGPU2 /IBM*0,IBM*0/
C     DATA PGFL,PGPU /IBM*1.0E+07,IBM*1.0E+07/
C     DATA TGPL,TGPU /IBM*1.0E+03,IBM*1.0E+03/
C     DATA AGLS /2.00E-06/
C     DATA DHGB /1.00E-04/
C     DATA TMFAIL /1.50E+02/
C     DATA TRUPT /0.0E+00/
C     DATA RJGB /6.33293E+05/
C     DATA GAMGB /1.50E+00/
C     DATA UOGB /6.25E-04/
C     DATA TOGB /726.85/
C     DATA AFRGB /7.915E-02/
C     DATA BFRGB /-2.5E-01/
C
C   /* ADDITION OF MODEL
C   */
C   /* STRBRK
C   */
C   *I STRBRK.1349
C     CALL FPCFLW
C
C   /* SIIIPR
C   */
C   *I HS398.4
C     OPEN( CONVERT='BIG_ENDIAN',UNIT=97 ,STATUS='UNKNOWN' )
C     * ,FILE='SIMFP',FORM='UNFORMATTED'
C   *I SIIIPR.76
C     OPEN(UNIT=97 ,STATUS='UNKNOWN',FILE='SIMFP',FORM='UNFORMATTED'
C

```

```

)
*I INITIL.146
  CALL INFFBF
*I SIIIPR.193
  CALL WFPBF
*I SIIIPR.325
  IF ( MOD(CYCLES,10).EQ.1 ) CALL WFPBF
*ID T88AO
*/
/* Correction set to read the fluid dynamics information from
/* the URANUS restart file in the calculation with neutronics.
*/
/* Provided by Y.TOBITA Aug. 25, 2000.
*/
/* RSTOPT(2) Flag to specify the content of RESTART file.
/*   =0: The RESTART file was created by SIMMER-III with the same
/*        HISTORIAN options (default).
/*   >0: The RESTART file is a URANUS RESTART file. RSTOPT(2) is the
/*        sequential number of RESTART dump to use for RESTART run.
*/
*D RDDMP.82
  IF ( RSTOPT(2).EQ.0 ) THEN
    C --> Read the RESTART file with the same code options (default).
    NRCS = NRDPMP
    ELSE
    C --> Read the URANUS RESTART file in the run with neutronics.
    NRCS = NRPFLD
  ENDIF
/*
*D RDDMP.91.92
  NRSCD = NRDPMP*MAX(NXDMP,0)
  CALL SKIPRC(DMPRFU,NRSCD)
*/
*D RDDMP.95.106
  READ(DMPRFU,ERR=800,END=800) DUMPNO, LNLENG
  IF (DUMPNO.NE.NDMP) THEN
    C --> The DUMP NUMBER does not match the input 'NDMP'
    --> Skip to the next DUMP record.
    IF (DUMPNO.LE.0) GOTO 990
    WRITE(OUTFU,9000) NDMP,DUMPNO
    I = NRCS - 1
    CALL SKIPRC(DMPRFU,I)
    GO TO 20
  ELSE
    C --> The DUMP is read hereafter.
    BACKSPACE DMPRFU
  END IF
/*
*I RDDMP.116
  IF ( RSTOPT(2).EQ.0 ) THEN
*/
*I RDDMP.183
C
  ELSE
    C --> Read only the fluid dynamic status from URANUS DUMP file.
    CALL ROUNF(DMPRFU, DUMPNO, LNLENG, IPRC )
    CALL SKIPF(DMPRFU,5)
    CALL ROUNF(DMPRFU, ITERA , LNITER, IPRC )
    CALL SKIPF(DMPRFU,4)
    CALL ROUNF(DMPRFU, DHF , LNSTRC, IPRC )
    CALL SKIPF(DMPRFU,17)
    CALL ROUNF(DMPRFU, HCDP , LNHTC , IPRC )
    CALL ROUNF(DMPRFU, CMFB , LNFBC , IPRC )
    CALL SKIPF(DMPRFU,1)
    CALL ROUNF(DMPRFU, EPSVEL, LNEPSI, IPRC )
    CALL SKIPF(DMPRFU,1)
    CALL ROUNF(DMPRFU, DTDP5 , LNEQPR, IPRC )
    CALL ROUNF(DMPRFU, REGN , LNEORG, IPRC )
    CALL ROUNF(DMPRFU, ALPK , LNLCLM, IPRC )
    CALL SKIPF(DMPRFU,1)
    CALL ROUNF(DMPRFU, ALPM , LNLCLM, IPRC )
    CALL SKIPF(DMPRFU,1)
    CALL ROUNF(DMPRFU, RGK0 , LNS2T3, IPRC )
    CALL ROUNF(DMPRFU, S2PEOS, LN154L, IPRC )
    CALL SKIPF(DMPRFU,2)
    CALL ROUNF(DMPRFU, PHI , INTFCO, IPRC )
    CALL SKIPF(DMPRFU,2)
    CALL ROUNF(DMPRFU, G51P , LNPFNS, IPRC )
    CALL ROUNF(DMPRFU, DTSE , INTIMC, IPRC )
    CALL SKIPF(DMPRFU,1)
    CALL ROUNF(DMPRFU, REN , LNPNIN, IPRC )
    CALL ROUNF(DMPRFU, RENP , LNPNINP, IPRC )
    CALL SKIPF(DMPRFU,2)
    CALL ROUNF(DMPRFU, FMELT , LNPNIN, IPRC )
    C --- DUMP record for FF Gas release
    CALL ROUNF(DMPRFU, DHGLS , LNFFF1, IPRC )
    C
    CALL ROUNF(DMPRFU, HEGM , LNINODE, IPRC )
    CALL ROUNF(DMPRFU, EPSPCV, LNSOLC, IPRC )
    CALL SKIPF(DMPRFU,1)
    CALL ROUNF(DMPRFU, ALPENC, LNINPA, IPRC )
    CALL ROUNF(DMPRFU, LDLCVF, LNFDIN, IPRC )
    CALL ROUNF(DMPRFU, RAMDA , LNMMTH, IPRC )
    CALL ROUNF(DMPRFU, CNFI , LNCFMD, IPRC )
    CALL ROUNF(DMPRFU, VISLT , LNTURB, IPRC )
    C
    CALL INLEN
    --> Re-define the length of COMMON BLOCKS.
    C
    RETURN
  ENDIF
/*
*D RDDMP.205
C
  800 CONTINUE
  WRITE(OUTFU,9000) NDMP,DUMPNO
  STOP
*/
*I INITIL.142
C
  IF ( RSTOPT(2).NE.0 ) THEN
    IIDMP = RSTOPT(2)
    C
    ---{ SAVE CURRENT DATE AND TIME }
    CDAT=STDAT(2)
    CTIM=CLTIM(2)
    C
    CALL RDDMP(IIDMP)
    C
    ---{ RESTORE THE CURRENT DATE AND TIME }
    STDAT(2)=CDAT
    CLTIM(2)=CTIM
  ENDIF
*ID CHUNK
*/
*I STEP1.129
  6 ALPINK,ALPSK ,SALMK ,PK
*I MXF.12
  6 ALPINK,ALPSK ,SALMK ,PK
*I SG417.32
  DIMENSION ALPINK(MMS),ALPSK(MMS,*),SALMK(MMS,*),PK(MMS)
  LOGICAL PINREG, CHUNKL, CHUNKB
*I MXF.1942
C
C  CHUNK MODEL
C  -----
  IF ( MXFOPT(6).EQ.0 ) THEN
    C
    DO 12400 IM = 4, 6
    DO 12400 NN = 1, NIZC
      N = NMZC(NN)
      NQ = IVDL(IM)
      NA = ICVMGT( N, N+IBP2, VK(N,NQ).LT.ZERO )
      ND = ICVMGT( N+IBP2, N, VK(N,NQ).LT.ZERO )
      APIND = ALPINK(ND)+ ALPSK(ND,1)
      APINA = ALPINK(NA)+ ALPSK(NA,1)
      CHUNKL = .FALSE.
      CHUNKB = .FALSE.
      C
      IF ( APIND.GT.SMALL ) THEN
        DCHD = CP7*DHK(ND)
      ELSE
        DCHD = DHK(ND)
      ENDIF
      IF ( APINA.GT.SMALL ) THEN
        DCHA = CP7*DHK(NA)
      ELSE
        DCHA = DHK(NA)
      ENDIF
      C
      PINREG = APINA.GT.SMALL
      C
      --- DIAMETER OF THE PARTICLE IN DONOR CELL
      DLU = SIX*ALPLK(ND,IM)/2(SALMK(ND,IM))
      C
      --- BLOCKAGE BY LARGE CHUNK
      CHUNKL = DLU .GT. 0.71*DCHA
      C
      --- BLOCKAGE BY BRIDGE FORMATION
      IF ( DCHA.LT.DCHD - DLU ) THEN
        CHUNKB = DLU .GE. 0.17*DHK(NA)
      ELSE
        CHUNKB = DLU .GE. 0.24*DHK(NA)
      ENDIF
      ELSEIF ( DCHA.LT.DCHD - HALF*DLU ) THEN
        IF ( PINREG ) THEN
          CHUNKB = DLU .GE. 0.35*DHK(NA)
        ELSE
          CHUNKB = DLU .GE. 0.50*DHK(NA)
        ENDIF
      ENDIF
      C
      ALPLU = ALPLK(NA,IM)/2(ONE - ASM(NA))
      IF ( ALPLU.GT.CSM2 .AND. (CHUNKL.OR.CHUNKB) .AND.
       6 PK(ND) - PK(NA).LE.2.0D+6 ) THEN
        AQSTH(N,NQ) = AQSTH(N,NQ) + C1E12
        BQSTK(N,NQ) = BQSTK(N,NQ) + C1E12
      ENDIF
      12400 CONTINUE
      C
      ENDIF
*ID T8340
/*
*----- AD-HOC CORRECTION SET TO CONTROL THE PARTICLE VISCOSITY MODEL.
*  IF MXFOPT(99)<>1, THE LIQUID COMPONENTS WHICH BELONGS TO THE
*  SAME VELOCITY FIELD ARE TAKEN INTO ACCOUNT IN THE CALCULATION
*  OF THE PARTICLE VISCOSITY.
*-----
* FIRST PROVIDED BY Y.TOBITA            3 APRIL 2000
*-----
*----- B1 REGION -----
*I MXF.1206
  LMQ = IVDL(IM)
*I MXF.1207
  IF ( MXFOPT(99).EQ.0 ) THEN
    *I MXF.1213
    ELSE
      AL1 = CVMST( ALPLB1(N,1), ZERO, IVDL(1).EQ.LMQ )
      AL2 = CVMST( ALPLB1(N,2), ZERO, IVDL(2).EQ.LMQ )
      AL3 = CVMST( ALPLB1(N,3), ZERO, IVDL(3).EQ.LMQ )
      AL4 = CVMST( ALPLB1(N,4), ZERO, IVDL(4).EQ.LMQ )
      AL5 = CVMST( ALPLB1(N,5), ZERO, IVDL(5).EQ.LMQ )
      AL6 = CVMST( ALPLB1(N,6), ZERO, IVDL(6).EQ.LMQ )
    ENDIF
    *I MXF.1239
    LMQ = IVDL(IM)
    C
    IF ( MXFOPT(99).EQ.0 ) THEN
      AL4 = ALPLB1(N,4)
      AL5 = ALPLB1(N,5)
    ENDIF
  ENDIF

```

```

      AL6 = ALPLB1(N,6)
      ELSE
      AL4 = CVMGT( ALPLB1(N,4), ZERO, IVDL(4).EQ.IMQ )
      AL5 = CVMGT( ALPLB1(N,5), ZERO, IVDL(5).EQ.IMQ )
      AL6 = CVMGT( ALPLB1(N,6), ZERO, IVDL(6).EQ.IMQ )
      ENDIF
C
*D KM7J7.19,21
      AL46L = AL4*PSI(RIMBK(N,4),DHK(N))
      & + AL5*PSI(RIMBK(N,5),DHK(N))
      & + AL6*PSI(RIMBK(N,6),DHK(N))
*D KM7J7.23,25
      AL46L = AL4*PSI2(RIMBK(N,4))
      & + AL5*PSI2(RIMBK(N,5))
      & + AL6*PSI2(RIMBK(N,6))
*/
/* ----- B2 REGION -----
*/
*I MXF.1332
      IMQ = IVDL(IM)
*I MXF.1333
      IF ( MXFOPT(99).EQ.0 ) THEN
*I MXF.1339
      ELSE
      AL1 = CVMGT( ALPLB1(N,1), ZERO, IVDL(1).EQ.IMQ )
      AL2 = CVMGT( ALPLB1(N,2), ZERO, IVDL(2).EQ.IMQ )
      AL3 = CVMGT( ALPLB1(N,3), ZERO, IVDL(3).EQ.IMQ )
      AL4 = CVMGT( ALPLB1(N,4), ZERO, IVDL(4).EQ.IMQ )
      AL5 = CVMGT( ALPLB1(N,5), ZERO, IVDL(5).EQ.IMQ )
      AL6 = CVMGT( ALPLB1(N,6), ZERO, IVDL(6).EQ.IMQ )
      ENDIF
*I MXF.1365
      IMQ = IVDL(IM)
C
      IF ( MXFOPT(99).EQ.0 ) THEN
      AL4 = ALPLB1(N,4)
      AL5 = ALPLB1(N,5)
      AL6 = ALPLB1(N,6)
      ELSE
      AL4 = CVMGT( ALPLB1(N,4), ZERO, IVDL(4).EQ.IMQ )
      AL5 = CVMGT( ALPLB1(N,5), ZERO, IVDL(5).EQ.IMQ )
      AL6 = CVMGT( ALPLB1(N,6), ZERO, IVDL(6).EQ.IMQ )
      ENDIF
C
*D KM7J7.37,39
      AL46L = AL4*PSI(RIMBK(N,4),DHK(N))
      & + AL5*PSI(RIMBK(N,5),DHK(N))
      & + AL6*PSI(RIMBK(N,6),DHK(N))
*D KM7J7.41,43
      AL46L = AL4*PSI2(RIMBK(N,4))
      & + AL5*PSI2(RIMBK(N,5))
      & + AL6*PSI2(RIMBK(N,6))
*/
/* ----- D REGION -----
*/
*I MXF.1471
      IMQ = IVDL(IM)
C
      IF ( MXFOPT(99).EQ.0 ) THEN
      AL4 = ALPLK(N,4)
      AL5 = ALPLK(N,5)
      AL6 = ALPLK(N,6)
      ELSE
      AL4 = CVMGT( ALPLK(N,4), ZERO, IVDL(4).EQ.IMQ )
      AL5 = CVMGT( ALPLK(N,5), ZERO, IVDL(5).EQ.IMQ )
      AL6 = CVMGT( ALPLK(N,6), ZERO, IVDL(6).EQ.IMQ )
      ENDIF
*D KM7J7.46,48
      AL46L = AL4*PSI(RIMBK(N,4),DHK(N))
      & + AL5*PSI(RIMBK(N,5),DHK(N))
      & + AL6*PSI(RIMBK(N,6),DHK(N))
*D KM7J7.50,52
      AL46L = AL4*PSI2(RIMBK(N,4))
      & + AL5*PSI2(RIMBK(N,5))
      & + AL6*PSI2(RIMBK(N,6))
*D TBY79
*/
*I STEP2.65
      * ,XB (MM5) ,ICP (MM5)
*D STEP2.263
      * ,XI ,ZETA ,XB ,ICP
*/
*I STEP4.92
      * ,XB (MM5) ,ICP (MM5)
*D STEP4.381
      * ,XI ,ZETA ,XB ,ICP
*/
*D DISMX.7
      * ,XI ,ZETA ,XB ,ICP
*I DISMX.27
      * ,XB (*) ,ICP (*)
*/
*I DISMX.35
C
      XB (N) = ZERO
      ICP (N) = 0
*D DISMX.39,41
      ICP(N) = ICVMGT(1,3,ALPLM(N,1).GE.ALPLM(N,3))
      & ,ICVMGT(2,3,ALPLM(N,2).GE.ALPLM(N,3))
      & ,ALPLM(N,1).GE.ALPLM(N,2) )
*D DISMX.45,52
      XB(N) = ((ONE -ALPBUB)*(ALPDSP-ALPSTR))
      & /((ALPDSP-ALPBUB)*(ONE -ALPSTR))
*D DISMX.71,85
*/
*D DISMX.209,228
      FLM = ZERO
      FLM1 = ZERO
      FLM2 = ZERO
      IF ( XB(N).GT.ZERO .AND. XB(N+1).GT.ZERO .AND.
      & ICP(N).EQ.L .AND. ICP(N+1).EQ.L ) FLM = ONE
      IF ( XB(N) .GT.ZERO .AND. XB(N+1) .GT.ZERO .AND.
      & XB(N+NR) .GT.ZERO .AND. XB(N+NR+1) .GT.ZERO .AND.
      & ICP(N) .EQ.L .AND. ICP(N+1) .EQ.L .AND.
      & ICP(N-NR) .EQ.L .AND. ICP(N-NR+1) .EQ.L ) FLM1 = ONE
      IF ( XB(N) .GT.ZERO .AND. XB(N+1) .GT.ZERO .AND.
      & XB(N-NR) .GT.ZERO .AND. XB(N-NR+1) .GT.ZERO .AND.
      & ICP(N) .EQ.L .AND. ICP(N+1) .EQ.L .AND.
      & ICP(N-NR) .EQ.L .AND. ICP(N-NR+1) .EQ.L ) FLM2 = ONE
C
      DISLM(N,L) = ONE/RX1/DRB(N)*FLAM
      *TT*(ALPCEN(N+1,L)*RM2*VISCE(N+1,L)*(TWO*DUDX(N+1,L)
      & -URX1 -DUDX(N+1,L))
      * -ALPCEN(N,L)*RX3*VISCE(N,L)*(TWO*DUDX(N,L)
      & -URX2 -DUDX(N,L))
      & +ONE /D2C(N)
      *(ALPHAF(N+1,L)*VISHAF(N,L)*( DUDZ(N+NR,L)
      & +DUDX(N+1,L))
      * -ALPHAF(N-NR,L)*VISHAF(N-NR,L)*( DUDZ(N,L)
      & +DUDX(N+1-NR,L))
      * +FLAM1
      * -ALPHAF(N-NR,L)*VISHAF(N-NR,L)*( DUDZ(N,L)
      & +DUDX(N+1-NR,L))
      * +FLAM2
      )
C
      FTHE = ZERO
      FTHE1 = ZERO
      FTHE2 = ZERO
      IF ( XB(N).GT.ZERO .AND. XB(N+NR).GT.ZERO .AND.
      & ICP(N).EQ.L .AND. ICP(N+NR).EQ.L ) FTHE = ONE
      IF ( XB(N) .GT.ZERO .AND. XB(N+1) .GT.ZERO .AND.
      & XB(N+NR) .GT.ZERO .AND. XB(N+NR+1) .GT.ZERO .AND.
      & ICP(N) .EQ.L .AND. ICP(N+1) .EQ.L .AND.
      & ICP(N+NR) .EQ.L .AND. ICP(N+NR+1) .EQ.L ) FTHE1 = ONE
      IF ( XB(N) .GT.ZERO .AND. XB(N-1) .GT.ZERO .AND.
      & XB(N+NR) .GT.ZERO .AND. XB(N+NR-1) .GT.ZERO .AND.
      & ICP(N) .EQ.L .AND. ICP(N-1) .EQ.L .AND.
      & ICP(N+NR) .EQ.L .AND. ICP(N+NR-1) .EQ.L ) FTHE2 = ONE
C
      DISTRE(N,L) = ONE/RZ1/DRC(N)
      *(ALPHAF(N,L)*RZ2*VISHAF(N,L)*( DUDZ(N+NR,L)
      & +DUDX(N+1,L))
      * -ALPHAF(N-1,L)*RZ3*VISHAF(N-1,L)*( DUDZ(N+NR-1,L)
      & +DUDX(N,L))
      * +FTHE2
      * +ONE /D2B(N)*FTHE
      *TT*(ALPCEN(N+NR,L)*VISCE(N+NR,L)*(TWO*DUDZ(N+NR,L)
      & -URZ1 -DUDX(N+NR,L))
      * -ALPCEN(N,L)*VISCE(N,L)*(TWO*DUDZ(N,L)
      & -URZ2 -DUDX(N,L))
      *
      */

```

付録4 鉛冷却材中における燃料の終端速度

鉛冷却 MOX 燃料炉の炉心崩壊事故では、被覆管が溶融浮上して炉心から失われた後、燃料ペレット、もしくは燃料ペレットが崩壊した燃料固体粒子が単相の冷却材の中に分散する状態となる。付録1で示したように、1000K 以上の温度領域では燃料の密度が鉛の密度よりもわずかに高いため、上向きの鉛冷却材流れが存在しない限りは、燃料は徐々に沈降し、再臨界を引き起こすことがケース1の解析によって示された。ここでは、燃料粒子が沈降しない上向き冷却材流速を概算する。このために、燃料粒子群が全体として沈降せずに高さを保つためには、冷却材の流速の平均値が燃料粒子の終端速度となっていればよいと仮定する。流体中に存在する粒子の終端速度は次式で与えられる。

エラー! 編集中のフィールド コードからは、オブジェクトを作成できません。 (3-1)

ここで、 ρ_s は粒子の密度、 ρ_f は流体の密度、 D は粒子の直径、 g は重力加速度、 C_D は抵抗係数である。粒子群の抵抗係数は Ishii^[3-1]により以下のように与えられている。

$$C_D = 0.45 \left[\frac{1 + 17.67F^{6/7}}{18.67F} \right]^2, \quad F = \frac{\sqrt{1 - \alpha_s}}{\max(1 - \alpha_s / \alpha_{dm}, 10^{-10})^{-2.5\alpha_{dm}}} \quad (3-2)$$

ここで、 α_s は粒子の体積率、 α_{dm} はパラメータで $\alpha_{dm} = 0.62$ が推奨されている。物性値として、1700K における $\rho_s = 9920$ (空隙率 95%を仮定)、 $\rho_f = 9300$ を用いて、直径 8 mm の粒子に対する終端速度を体積率の関数として求めると次図のようになる。

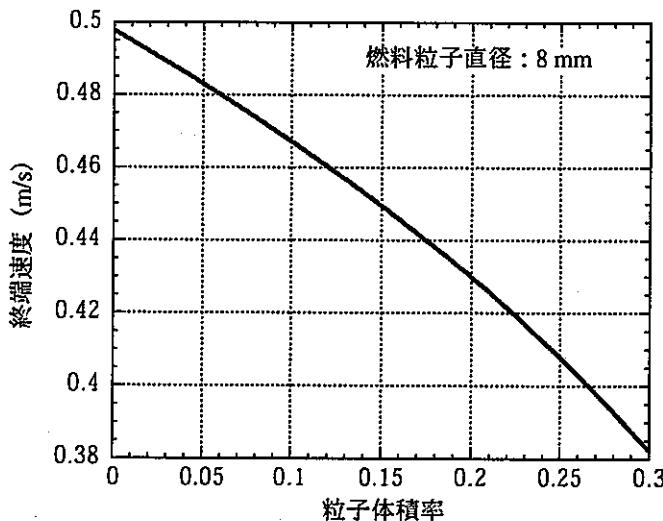


図 3-1 固体燃料粒子の鉛冷却材中における終端速度 (直径 8 mm)

このグラフで、粒子体積率が 0.0 は無限媒質中に単独で存在する燃料粒子に相当する。

実際には燃料粒子が炉心近傍に単独で存在することではなく、他の粒子と体積率 10~30% 程度で存在すると考えられる。従って、炉心位置で約 0.5 m/s 以上の冷却材上向き流速を確保できれば燃料は沈降することはないと考えられる。

参考文献

- [3-1] M. Ishii and N. Zuber, Drag Coefficient and Relative Velocity in Bubbly, Droplet or Particulate Flows, AIChE Journal, Vol.25, No.5, pp.843-855, September 1979.