

安全容器内での損傷炉心物質の臨界性の評価

1. 概要

LORL 等の崩壊熱除去機能喪失型の事象において、損傷炉心物質が安全容器内に移行する際の臨界性の評価についてまとめた。

2. 解析対象の事象推移の整理

以下に示す「常陽」の崩壊熱除去機能喪失事象の事象推移を踏まえて、損傷炉心物質、堆積形状等を設定した。

- (1) 原子炉容器の冷却材液位が炉心頂部に達した後、液位よりも上に露出した炉心は被覆管の溶融によって崩壊し、溶融スチールと固体ペレットの混合物を形成する。
- (2) 液位の低下に従って炉心よりも下にある構造物は炉心からの熱負荷で溶融又はクリープ破損し、損傷炉心物質は下部プレナム内のナトリウム中へ落下する。
- (3) ナトリウム中に沈降した損傷炉心物質からの熱負荷とその荷重によって原子炉容器底部がクリープ破損し、損傷炉心物質は安全容器内の原子炉容器振れ止め構造物内の遮へいグラファイト上に落下する。

3. 解析内容

2. の事象推移を踏まえて、損傷炉心物質が原子炉容器底部から移行し、安全容器内の黒鉛上に堆積した状態について解析した。

4. 解析条件

4.1 解析コード

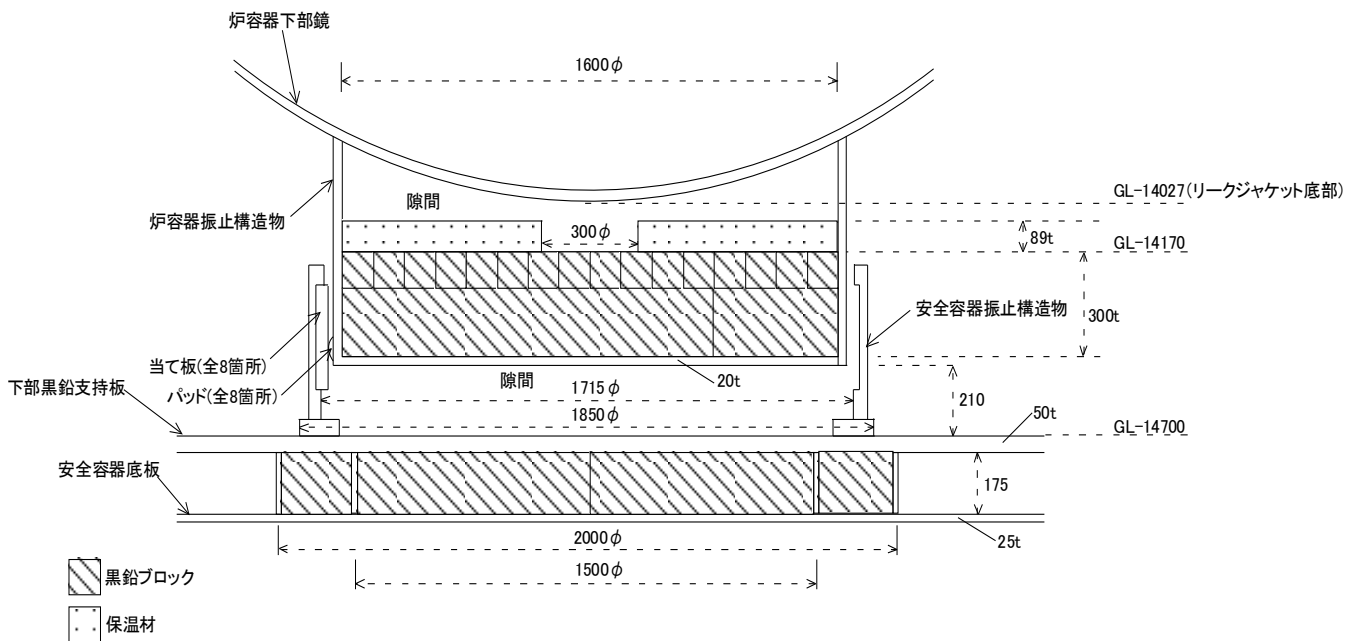
解析コードは現実的な幾何形状をモデル化するために、モンテカルロコードMVPを使用した。MVPコードは臨界安全評価に広く用いられており、黒鉛（グラファイト）反射体体系を含むベンチマーク計算により検証され、推定臨界下限増倍率^{*}は、0.98 と評価されている^[1]。本評価では、保守的に実効増倍率0.95 を臨界判断基準とする。

※ 臨界超過確率 2.5%、信頼度 97.5%として、これ以下ならば臨界にならないと判断される中性子増倍率の値

4.2 解析体系

原子炉容器の下部構造を第1図に示す。

炉容器振止構造物（内半径 800mm）は、原子炉容器からぶら下がる構造となっており、原子炉容器下部鏡、リークジャケットの下の空間に炉容器保温パネル（ステンレス鋼）、黒鉛ブロックが収納される。



第1図 原子炉容器の下部構造

4.3 解析条件

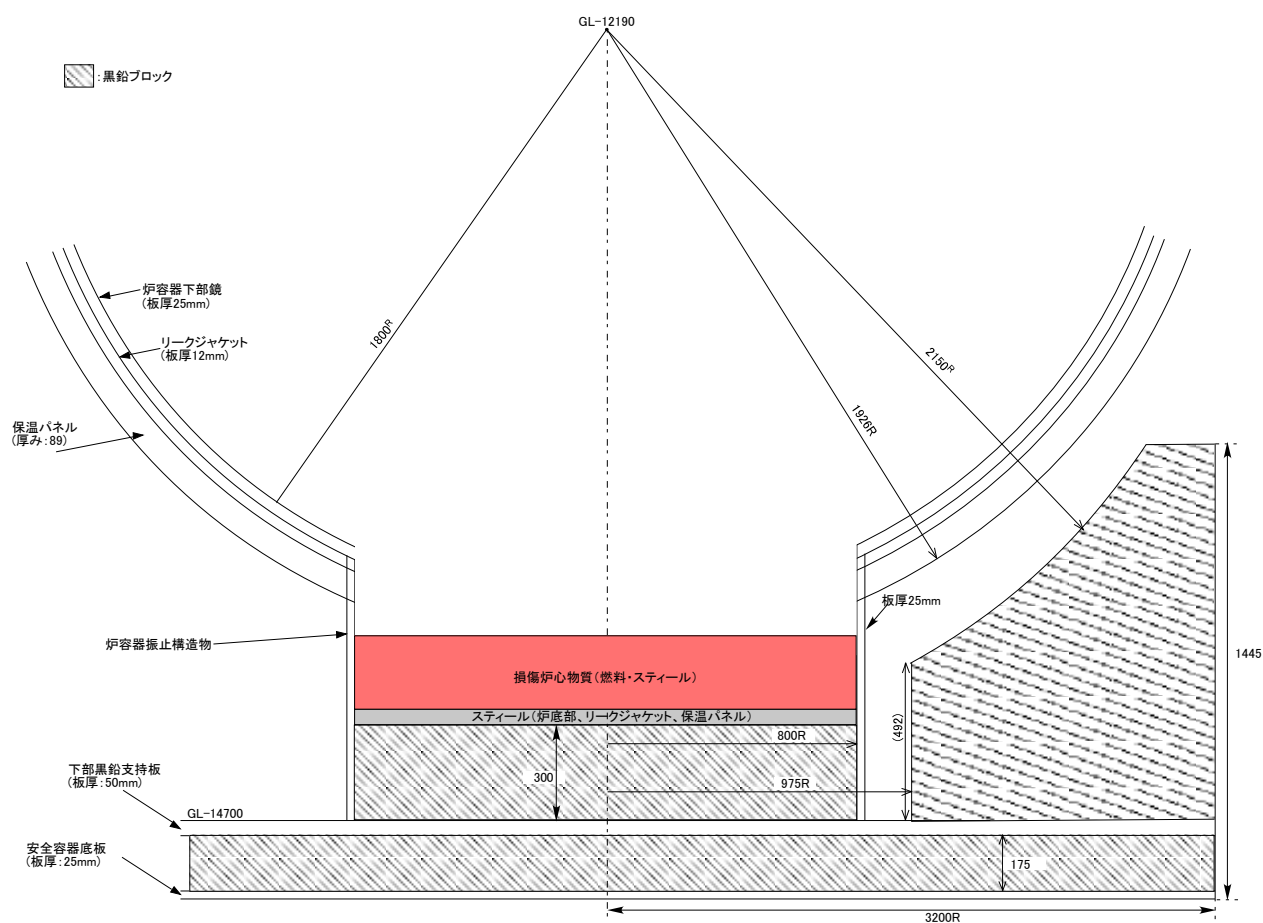
損傷炉心物質が原子炉容器底部から落下し、安全容器内の黒鉛上に堆積した状態を想定し、損傷炉心物質の移行割合に関する感度解析を実施した。解析体系図を第2図、解析体系等の諸条件を第1表に示す。

解析体系は、健全状態の構造（第1図）に対して、原子炉容器及び炉容器振止構造物の側板が熱膨張するとともにクリープ変形することが考えられることから、炉容器振止構造物と下部黒鉛支持板の隙間がなくなるものとした。炉容器振止構造物（内半径 800mm）の範囲で、黒鉛上には原子炉容器下部鏡、リークジャケットと炉容器保温パネルが黒鉛上に堆積するものとした。

損傷炉心物質の物量は、全炉心を炉心燃料集合体としたときの燃料及びスチールの全質量に対して、移行割合を掛けた体積とした。

損傷炉心物質の物量を第2表に、損傷炉心物質の堆積厚みを第3表に示す。この堆積厚みは第2表に示す燃料とスチールの質量と密度から求められた損傷炉心物質の体積を基に算出したものである。

なお、臨界性を保守的に評価するため、制御棒及び後備炉停止制御棒（中性子吸収材）は損傷炉心物質内に全く移行しないものとした。



第2図 安全容器内の臨界性評価体系

第 1 表 幾何形状等の諸条件

	材質 (現規格)	形状 (mm)
原子炉容器	SUS27HP (SUS304)	厚み 25
リークジャケット	SUS27HP (SUS304)	厚み 12
炉容器保温パネル (炉容器底部)	SUS27HP (SUS304)	厚み 4
黒鉛ブロック (振止構造物内)	黒鉛 (グラファイト)	厚み 300
振止構造物	SUS27HP (SUS304)	厚み 25
下部黒鉛支持板	SM41A (SM400A)	厚み 50
黒鉛ブロック (振止構造物外)	黒鉛 (グラファイト)	厚み 200

第 2 表 損傷炉心物質の物量

項目	単位	数値
燃料質量	kg	875
燃料密度	kg/m ³	1.07 × 10 ⁴
燃料体積	m ³	0.082
スチール質量	kg	3551
スチール密度	kg/m ³	7.6 × 10 ³
スチール体積	m ³	0.468
炉心物質体積	m ³	0.550

第 3 表 損傷炉心物質の堆積厚み

移行割合 (%)	堆積厚み (mm)
20	54.7
40	109.4
60	164.1
80	218.8
100	273.5

5. 解析結果

解析結果を第4表に示す。最も厳しい条件である移行割合100%の場合においても実効増倍率は約0.53であり、再臨界のおそれがないことを確認した。

第4表 解析結果

移行割合 (%)	実効増倍率	標準偏差
20	0.1414	0.069%
40	0.2542	0.051%
60	0.3558	0.048%
80	0.4468	0.039%
100	0.5261	0.035%

6. パラメータサーベイ

6.1 堆積物径による影響

上記では、損傷炉心物質が振止構造物の内半径（800mm）で堆積するものとしたが、健全時の炉心半径に相当する400mmで堆積すると仮想した解析を行った。なお、移行割合は100%とした。結果を第5表に示す。

堆積物径が縮小することにより、実効増倍率が増加するものの、再臨界のおそれがないことを確認した。

第5表 堆積物径による影響

堆積半径(mm)	堆積厚み(mm)	実効増倍率	標準偏差
800	273.5	0.5261	0.035%
400	1094.2	0.6756	0.033%

6.2 損傷炉心物質の混合状態による影響

2. の事象推移の通り、LORL等の崩壊熱除去機能喪失型の事象では、燃料（ペレット）は溶融することなく、安全容器内においてスチールとの混合状態で存在すると想定されるものの、臨界性への影響を確認する観点で、損傷炉心物質内で燃料とスチールが完全に分離されることを仮想した解析を行った。なお、移行割合は100%とした。結果を第6表に示す。

損傷炉心物質の完全分離を仮想した場合においても、再臨界のおそれがないことを確認した。

第6表 損傷炉心物質の混合状態による影響

損傷炉心物質 (燃料／スチール)	堆積厚み(mm)	実効増倍率	標準偏差
混合	273.5	0.5261	0.035%
完全分離	燃料：40.8 スチール：232.7	0.8082	0.023%

6.3 損傷炉心物質の内側炉心・外側炉心の分離による影響

上記5. では、損傷炉心物質が振止構造物の内半径（800mm）に内側炉心と外側炉心が混合状態で堆積するものとしたが、内側炉心と外側炉心が分離状態で堆積するものとした解析を行った。なお、移行割合は100%とした。結果を第7表に示す。

損傷炉心物質の内側炉心・外側炉心が分離した場合においても、実効増倍率が増加することはなく、再臨界のおそれがないことを確認した。

第7表 損傷炉心物質の内側炉心・外側炉心の分離による影響

損傷炉心物質 (内側炉心／外側炉心)	堆積厚み(mm)	実効増倍率	標準偏差
混合	273.5	0.5261	0.035%
分離	273.5	0.5141	0.035%

6.4 損傷炉心物質の幾何形状による影響

上記では、損傷炉心物質が原子炉容器底部から落下し、安全容器内の黒鉛上に円筒状に堆積した状態を想定したが、円錐状に堆積することを想定した解析を行った。円錐は表面積が最小となるように底角 70.5° とした。なお、移行割合は100%とした。結果を第8表に示す。

堆積物形状を円錐状にすることにより、実効増倍率が増加するものの、再臨界のおそれがないことを確認した。

第8表 損傷炉心物質の幾何形状による影響

堆積物形状	移行割合	実効増倍率	標準偏差
円筒状	100%	0.5261	0.035%
円錐状	100%	0.6925	0.031%

参考文献

- [1]奥野 他、“臨界安全ハンドブック・データ集第2版（受託研究）”、JAEA-Data/Code 2009-010（2009）

以上