

# ナトリウム冷却炉の燃料取扱時除熱解析評価 (研究報告)

2004年11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

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries 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)

2004

## ナトリウム冷却炉の燃料取扱時除熱解析評価

近澤佳隆\*1、堀徹\*2、此村守\*1

### 要旨

実用化戦略調査研究フェーズ I では、ナトリウム冷却炉の燃料取扱設備として、EVST 方式および水プール直接貯蔵方式が検討された。両概念の成立性を比較評価するためには、燃料取扱時の除熱評価が重要になる。

本研究では EVST 方式および水プール直接貯蔵方式それぞれについて通常時の除熱方法を整理し、除熱が厳しくなる可能性がある箇所を抽出した。また、事故時については起回事象を整理し、除熱性評価の対象とすべき代表事象を抽出した。上記により抽出されたケースに対して定量的な除熱評価を行い、概念成立性評価および設備対応の整理を行った。

また、燃料被覆管材料である ODS 鋼のクリープ強度を反映して、燃料取扱時の制限温度を評価した。

---

\*1 大洗工学センター システム技術開発部 FBR システムグループ

\*2 大洗工学センター システム技術開発部 FBR システムグループ

(現：川崎重工業株式会社)

Heat Transfer Analysis during Fuel Handling  
in a Sodium Cooled Reactor

Yoshitaka Chikazawa\*<sup>1</sup>, Toru Hori\*<sup>2</sup>, Mamoru Konomura\*<sup>1</sup>

Abstract

In the phase I of a feasibility study on commercialized fast reactor cycle system of Japan Nuclear Cycle Development Institute, we are finding a concept of a fast reactor with satisfying various requirements, such as, high-level safety and improved economical competitiveness. There are two promising concepts of fuel handling systems, an external vessel storage tank type and a direct water pool loading type. In this study, these two types have been compared in the respect of spent fuel heat removal during fuel handling.

Heat removal systems of both fuel handling types have been compared and critical events have been listed up. Heat transfer analyses have been carried out for these critical events.

Allowable maximum cladding temperature for oxide dispersion strengthened (ODS) steel has been evaluated according to its creep strength.

---

1) FBR System Engineering Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC

2) FBR System Engineering Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC (present: Kawasaki Heavy Industries, LTD)

目次

1. はじめに	1
2. 検討対象	2
2.1 プラント概要	2
2.2 炉心燃料	10
2.3 EVST方式の燃料取扱設備	12
2.4 水プール直接貯蔵方式の燃料取扱設備	21
3. 除熱方法および事故事象の整理	29
3.1 除熱方法の整理	29
3.2 代表事故事象の整理	46
4. 除熱評価	67
4.1 ナトリウムポット間接冷却	68
4.2 ナトリウムポット間接冷却一部喪失	80
4.3 使用済燃料直接冷却	87
4.4 使用済燃料直接冷却喪失	97
4.5 破損燃料ナトリウムポット間接冷却	108
5. 被覆管制限温度評価	111
5.1 使用済燃料ナトリウムポット間接冷却の被覆管制限温度	112
5.2 使用済燃料直接冷却喪失時の被覆管制限温度	117
5.3 破損燃料の被覆管制限温度	118
6. おわりに	119
参考文献	121
謝辞	122

## 表リスト

表 2.1-1	ナトリウム冷却大型炉の基本仕様	3
表 2.1-2	ナトリウム冷却中型炉の基本仕様	4
表 2.2-1	ナトリウム冷却炉の炉心燃料仕様	11
表 3.1.1-1	使用済燃料の除熱方法 (EVST 方式)	31
表 3.1.1-2	破損燃料の除熱方法 (EVST 方式)	32
表 3.1.2-1	使用済燃料の除熱方法 (水プール直接貯蔵方式)	41
表 3.1.2-2	破損燃料の除熱方法 (水プール直接貯蔵方式)	42
表 3.2.2-1	除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (燃料出入機 : EVST 方式、未減衰燃料取扱時)	49
表 3.2.2-2	除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (燃料出入機 : EVST 方式、減衰後燃料取扱時)	51
表 3.2.2-3	除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (EVST : EVST 方式)	52
表 3.2.2-4	除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (燃料昇降装置 : EVST 方式)	53
表 3.2.2-5	除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (破損燃料検査設備 : EVST / 水プール直接貯蔵方式共通)	54
表 3.2.2-6	除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (使用済燃料プール : EVST 方式)	55
表 3.2.2-7	除熱性に係わる代表事象の整理結果 (EVST 方式)	56
表 3.2.2-8	除熱評価対象の抽出結果 (EVST 方式)	57
表 3.2.3-1	除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (燃料出入機 : 水プール直接貯蔵方式)	59
表 3.2.3-2	除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (回転移送機 : 水プール直接貯蔵方式)	61
表 3.2.3-3	除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (ナトリウム予熱槽 : 水プール直接貯蔵方式)	62
表 3.2.3-4	除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (燃料昇降装置 : 水プール直接貯蔵方式)	63
表 3.2.3-5	除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (使用済燃料プール : 水プール直接貯蔵方式)	64
表 3.2.3-6	除熱性に係わる代表事象の整理結果 (水プール直接貯蔵方式)	65
表 3.2.3-7	除熱評価対象の抽出結果 (水プール直接貯蔵方式)	66
表 4.4-1	直接冷却喪失時の被覆管制限温度到達時間	99
表 5.1-1	集合体発熱量とクリーブ損傷評価の関係	114

**図リスト**

図 2.1-1	ナトリウム冷却大型炉の系統概念図	5
図 2.1-2	ナトリウム冷却大型炉の原子炉構造概念図	6
図 2.1-3	ナトリウム冷却大型炉の配置立面図	7
図 2.1-4	ナトリウム冷却大型炉の配置平面図	8
図 2.1-5	ナトリウム冷却中型炉の系統概念図	9
図 2.3-1	使用済燃料輸送経路 (EVST 方式)	13
図 2.3-2	破損燃料輸送経路 (EVST 方式)	14
図 2.3-3	炉内中継装置概念図 (EVST 方式)	15
図 2.3-4	燃料出入機概念図 (EVST 方式)	16
図 2.3-5	炉外燃料貯蔵槽概念図 (EVST 方式)	17
図 2.3-6	燃料昇降装置概念図 (EVST 方式)	18
図 2.3-7	水プール概念図 (EVST 方式)	19
図 2.3-8	破損燃料検査装置概念図 (EVST 方式)	20
図 2.4-1	使用済燃料輸送経路 (水プール直接貯蔵方式)	22
図 2.4-2	破損燃料輸送経路 (水プール直接貯蔵方式)	23
図 2.4-3	燃料出入機概念図 (水プール直接貯蔵方式)	24
図 2.4-4	ナトリウム予熱槽概念図 (水プール直接貯蔵方式)	25
図 2.4-5	回転移送機概念図 (水プール直接貯蔵方式)	26
図 2.4-6	燃料昇降装置概念図 (水プール直接貯蔵方式)	27
図 2.4-7	水プール概念図 (水プール直接貯蔵方式)	28
図 3.1.1-1	炉内中継装置の冷却系概念図 (EVST 方式)	33
図 3.1.1-2	燃料出入機の冷却系系統概念図 (EVST 方式)	34
図 3.1.1-3	炉外燃料貯蔵槽の冷却系系統概念図 (EVST 方式)	35
図 3.1.1-4	燃料昇降装置の冷却系系統概念図 (EVST 方式)	36
図 3.1.1-5	水プールの冷却浄化系系統概念図 (EVST 方式)	37
図 3.1.1-6	破損燃料検査装置の冷却系系統概念図	38
図 3.1.2-1	燃料出入機の冷却系系統概念図 (水プール直接貯蔵方式)	43
図 3.1.2-2	回転移送機の冷却系系統概念図 (水プール直接貯蔵方式)	44
図 3.1.2-3	燃料昇降装置の冷却系系統概念図 (水プール直接貯蔵方式)	45
図 4.1-1	ナトリウムポット間接冷却の解析体系	72
図 4.1-2	ナトリウムポット間接冷却時の発熱量と被覆管温度の関係 (フィン付 3 集合体ポット)	73
図 4.1-3	ナトリウムポット間接冷却時の発熱量と被覆管温度の関係 (フィンなし 3 集合体ポット)	74

図 4.1-4	ナトリウムポット間接冷却時の発熱量と被覆管温度の関係 (フィン付 2 集合体ポット)	75
図 4.1-5	ナトリウムポット間接冷却時の発熱量と被覆管温度の関係 (フィンなし 2 集合体ポット)	76
図 4.1-6	ナトリウムポット間接冷却時の発熱量と被覆管温度の関係 (フィン付 1 集合体ポット)	77
図 4.1-7	ナトリウムポット間接冷却時の発熱量と被覆管温度の関係 (フィンなし 1 集合体ポット)	78
図 4.1-8	ナトリウムポット間接冷却時の冷却空気流量の影響	79
図 4.2-1	ナトリウムポット間接冷却一部喪失の解析体系	82
図 4.2-2	ナトリウムポット間接冷却解析結果 (冷却喪失部なし)	83
図 4.2-3	ナトリウムポット間接冷却一部喪失解析結果 (ケース 1)	84
図 4.2-4	ナトリウムポット間接冷却一部喪失解析結果 (ケース 2)	85
図 4.2-5	ナトリウムポット間接冷却一部喪失解析結果 (ケース 3)	86
図 4.3-1	直接冷却時の被覆管温度分布 (22kW/体)	90
図 4.3-2	直接冷却時の被覆管温度分布 (10kW/体)	91
図 4.3-3	直接冷却時の冷却ガス流量と圧力損失の関係 (22kW)	92
図 4.3-4	直接冷却時の冷却ガス流量と被覆管温度の関係 (22kW)	93
図 4.3-5	直接冷却時の冷却ガス流量と圧力損失の関係 (10kW)	94
図 4.3-6	直接冷却時の冷却ガス流量と被覆管温度の関係 (10kW)	95
図 4.3-7	直接冷却時の冷却ガス流量と被覆管温度の関係 (4kW)	96
図 4.4-1	直接冷却喪失時解析における計算体系	100
図 4.4-2	直接冷却喪失時の燃料要素各部の温度上昇 (ケース b)	101
図 4.4-3	直接冷却喪失時の燃料要素各部の温度上昇 (ケース d)	102
図 4.4-4	直接冷却喪失時のクリープ損傷評価 (ケース a)	103
図 4.4-5	直接冷却喪失時のクリープ損傷評価 (ケース b)	104
図 4.4-6	直接冷却喪失時のクリープ損傷評価 (ケース c)	105
図 4.4-7	直接冷却喪失時のクリープ損傷評価 (ケース d)	106
図 4.4-8	直接冷却喪失時の発熱量と CDF=0.1 に達する時間の関係	107
図 4.5-1	破損燃料ナトリウムポット間接冷却時の発熱量と被覆管温度の関係	110
図 5.1-1	ナトリウムポット間接冷却時のクリープ損傷評価 (フィンなし 1 集合体ポット、径 300mm)	115
図 5.1-2	ナトリウムポット間接冷却時のクリープ損傷評価 (フィンあり 2 集合体ポット、径 500mm)	116

## 1. はじめに

実用化戦略調査研究フェーズ I では、ナトリウム冷却炉の燃料取扱設備として、EVST 方式および水プール直接貯蔵方式が検討された。両概念の成立性を比較評価するためには、燃料取扱時の除熱評価が重要になる。このため、本研究においては以下の整理および評価を行った。

### (1) 除熱方法および事故事象の整理

EVST 方式および水プール直接貯蔵方式それぞれについて通常時の除熱方法を整理する。また、想定すべき事故事象と設備対応を整理して、事故時の除熱性評価の対象とすべき代表事象を抽出する。

### (2) 除熱性評価

(1)の除熱方法および事故事象の整理により抽出された評価対象事象について、定量的な除熱評価を行う。

### (3) 被覆管制限温度評価

燃料被覆管材料である ODS 鋼のクリープ強度を反映して、燃料取扱時の制限温度を評価する。

## 2. 検討対象

### 2.1 プラント概要

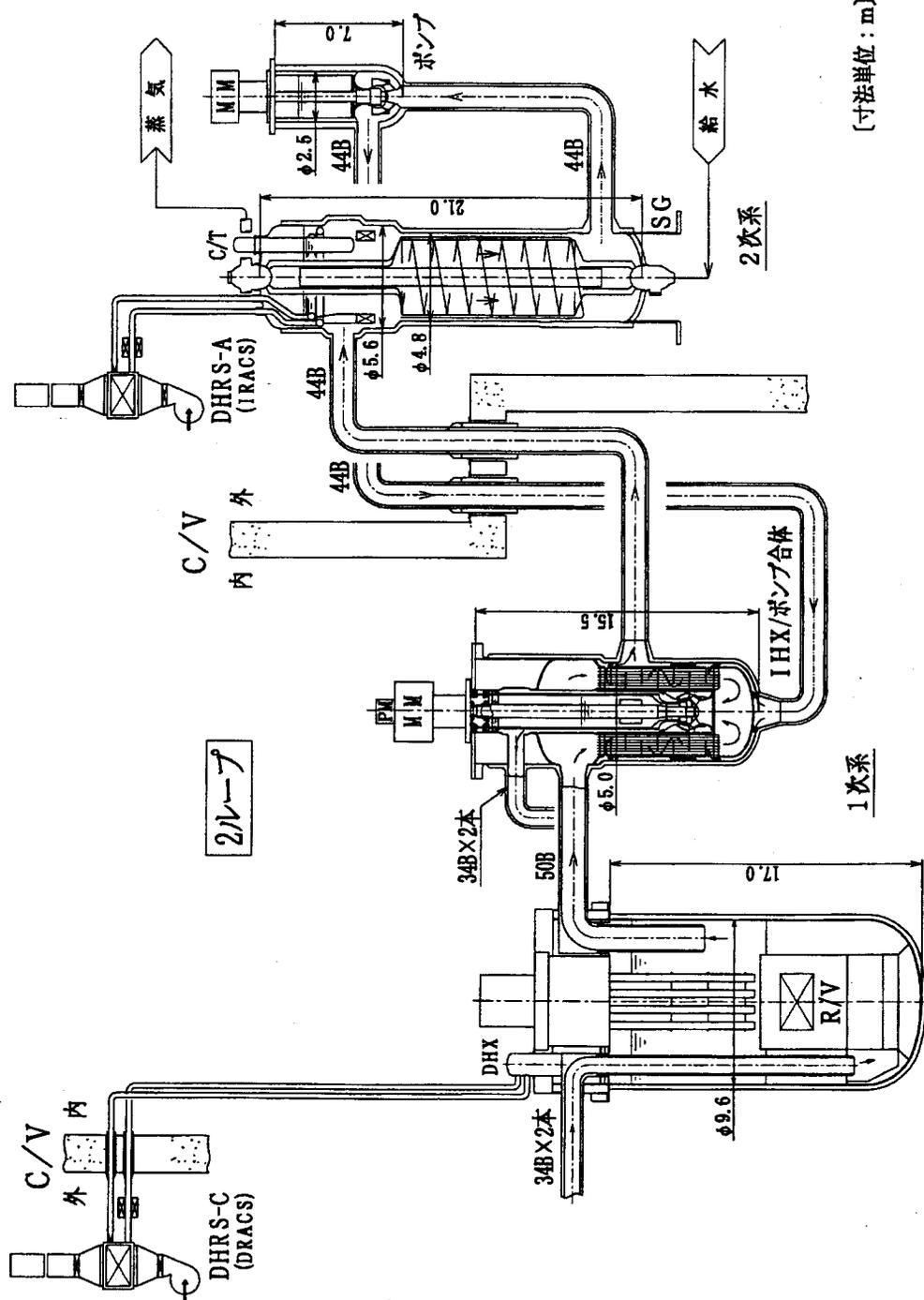
検討対象は平成 12 年度のナトリウム冷却大型炉およびナトリウム冷却中型炉の概念[1]とした。ナトリウム冷却大型炉のプラント基本仕様を表 2.1-1、系統概念図を図 2.1-1、原子炉構造図を図 2.1-2、建屋配置立面図を図 2.1-3、建屋配置平面図を図 2.1-4 に示す。ナトリウム冷却中型炉のプラント基本仕様を表 2.1-1、系統概念図を図 2.1-1 に示す。燃料取扱方式はナトリウム冷却大型炉については EVST 方式を採用している。ナトリウム冷却中型炉については燃料取扱設備の大幅合理化を目指して水プール直接貯蔵方式を採用している。

表 2.1-1 ナトリウム冷却大型炉の基本仕様

No	項目	基本仕様
1	原子炉型式	ナトリウム冷却ループ型炉
2	電気出力（発電端）	1500MWe
3	熱出力	3570MWt
4	ループ数	2ループ
5	1次系Na温度	550℃/395℃
6	2次系Na温度	520℃/335℃
7	1次系流量	3.27×10 <sup>4</sup> t/h/ループ
8	2次系流量	2.73×10 <sup>4</sup> t/h/ループ
9	主蒸気温度/圧力	495℃/16.9MPa
10	給水温度/流量	240℃/2.90×10 <sup>3</sup> t/h
11	タービン発電機	発電効率 42%以上
12	プラント稼働率	91%以上（プラント運転サイクル 16ヶ月の場合）
13	炉心・燃料	非均質炉心（回字型炉心）、混合酸化物燃料
14	遮蔽体外径	炉心槽内径：約 6500mm
15	燃焼度	約 15 万 MWd/t（取出平均）
16	増殖比	約 1.09（燃焼度約 1 1 万 MWd/t の場合、約 1.15）
17	原子炉停止系	主炉停止系＋後備炉停止系（制御棒 44 本）
18	炉心安全性	・受動的炉停止方策：SASS 設置、・再臨界回避方策：ボイド反応度を 5～6\$ に制限＋軸方向ブランケット一部削除
19	炉心支持方式	下部支持方式
20	炉壁保護構造	炉壁冷却なし
21	炉心上部機構	切込み付コラム型 UIS
22	1次系配管方式	トップエントリ方式
23	中間熱交換器	縦置無液面ジグザグ流式直管型（1次主循環ポンプ合体）
24	1次主循環ポンプ	機械式ポンプ
25	蒸気発生器	一体貫流ヘリカルコイル有液面型
26	2次主循環ポンプ	機械式ポンプ
27	崩壊熱除去方式	IRACS2 系統＋DRACS1 系統
28	Na漏えい対策	容器：ガードベッセル、配管：エンクロージャ
29	原子炉格納施設	鋼製ライナコンクリート格納施設
30	プラント運転サイクル	約 16ヶ月、4バッチ方式
31	免震	2次元（水平）免震
32	プラント寿命	40年
33	原子炉建屋	原子炉建屋容積約 11.5 万 m <sup>3</sup> /プラント（ツインプラント）

表 2.1-2 ナトリウム冷却中型炉の基本仕様

No	項目	基本仕様
1	原子炉型式	ナトリウム冷却ループ型炉
2	電気出力(発電端)	500MWe
3	熱出力	1190MWt
4	ループ数	2ループ
5	1次系Na温度	550℃/395℃
6	2次系Na温度	520℃/335℃
7	1次系流量	1.09×10 <sup>4</sup> t/h/ループ
8	2次系流量	1.82×10 <sup>4</sup> t/h/ループ
9	主蒸気温度/圧力	495℃/16.67MPa
10	給水温度/流量	240℃/0.945×10 <sup>3</sup> t/h
11	タービン発電機	蒸気タービン(3モジュールで共用)
12	プラント熱効率	約42%
13	プラント稼働率	約92%
14	炉心・燃料	混合酸化物燃料
15	遮蔽体外接円径	炉心槽内径:4000mm
16	燃焼度	約14万Mwd/t(取出平均)
17	増殖比	約1.21
18	原子炉停止系	主炉停止系+後備炉停止系(制御棒19本)
19	炉心安全性	①受動的炉停止方策: SASS設置、 ②再臨界回避方策: ボイド反応度を5~6\$に制限+上下軸方向ブランケット一部削除
20	炉心支持方式	下部支持方式
21	炉壁保護構造	ライナ構造方式(炉壁冷却なし)
22	炉心上部機構	コラム型UIS
23	1次系配管方式	上部流出入方式
24	中間熱交換器	縦置無液面ジグザグ流式直管型(1次主循環ポンプ合体)
25	1次主循環ポンプ	機械式ポンプ
26	蒸気発生器	一体貫流ヘリカルコイル有液面型
27	2次主循環ポンプ	機械式ポンプ
28	崩壊熱除去系	PRACS2系統+IRACS1系統
29	Na漏えい対策	容器: ガードベッセル、配管: 外管(2次系はエンクロージャ)
30	原子炉格納施設	鋼製ライナコンクリート格納施設
31	プラント運転サイクル	17ヶ月、4バッチ方式
32	免震	3次元免震(固有振動数は水平1Hz、上下5Hz程度)
33	プラント寿命	40年
34	原子炉建屋	原子炉建屋容積約52200m <sup>3</sup> /モジュール
35	モジュール構成	・原子炉モジュール×6 ・タービン発電機×2(原子炉モジュール3基で共用) ・その他BOP(可能な限り原子炉モジュール6基で共用)



[寸法単位：m]

図 2.1-1 ナトリウム冷却大型炉の系統概念図

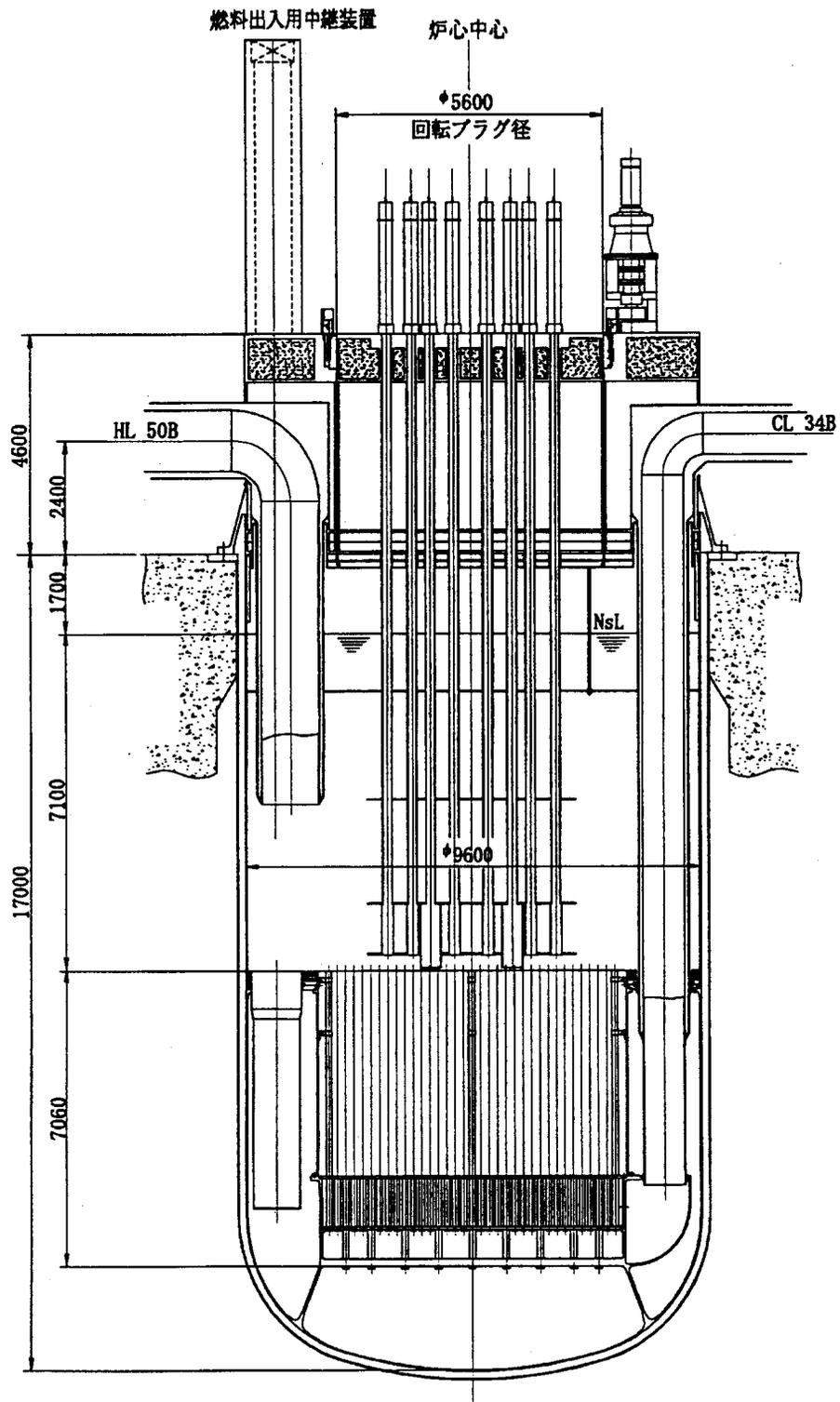


図 2.1-2 ナトリウム冷却大型炉の原子炉構造概念図



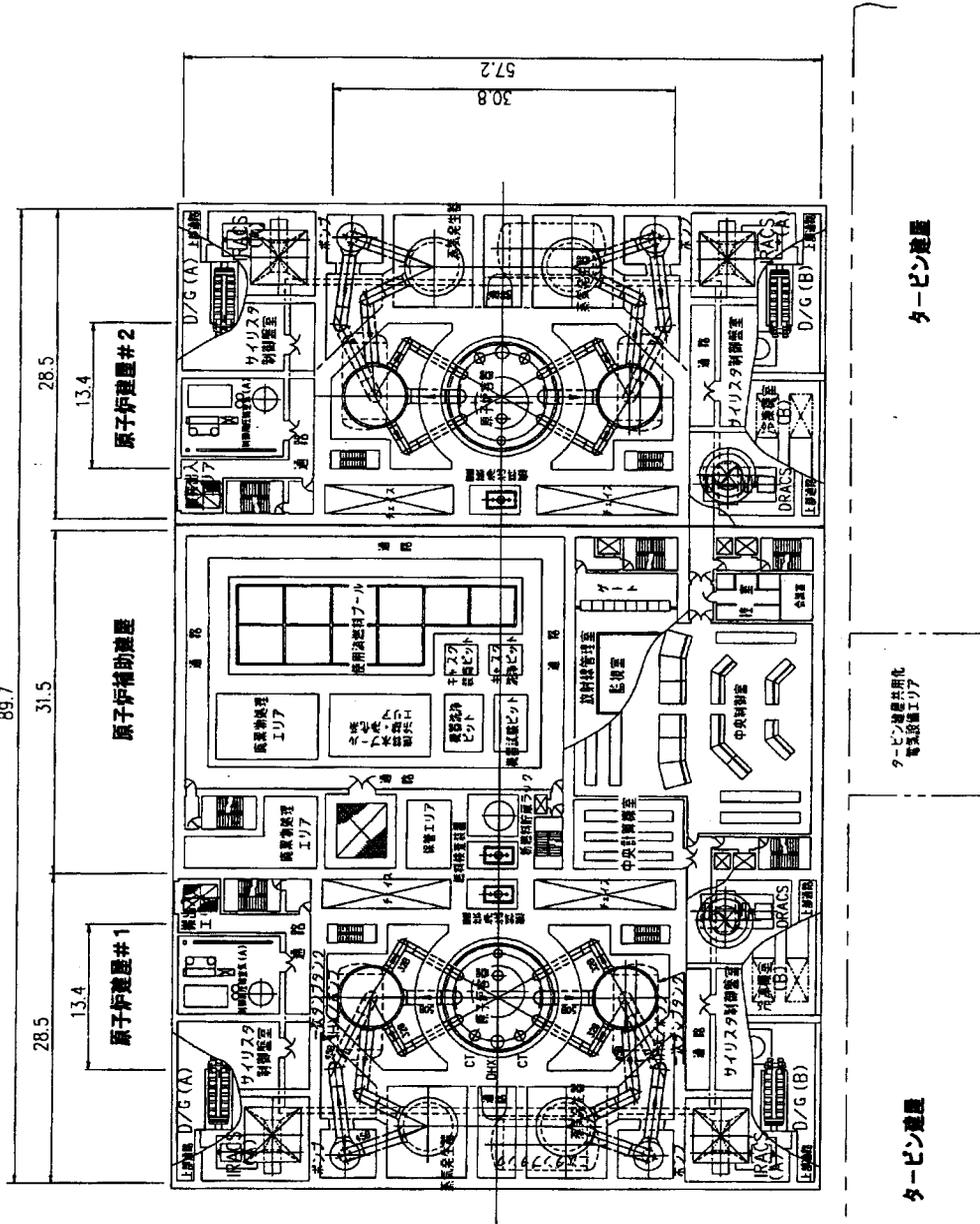


図 2.1-4 ナトリウム冷却大型炉の配置平面図

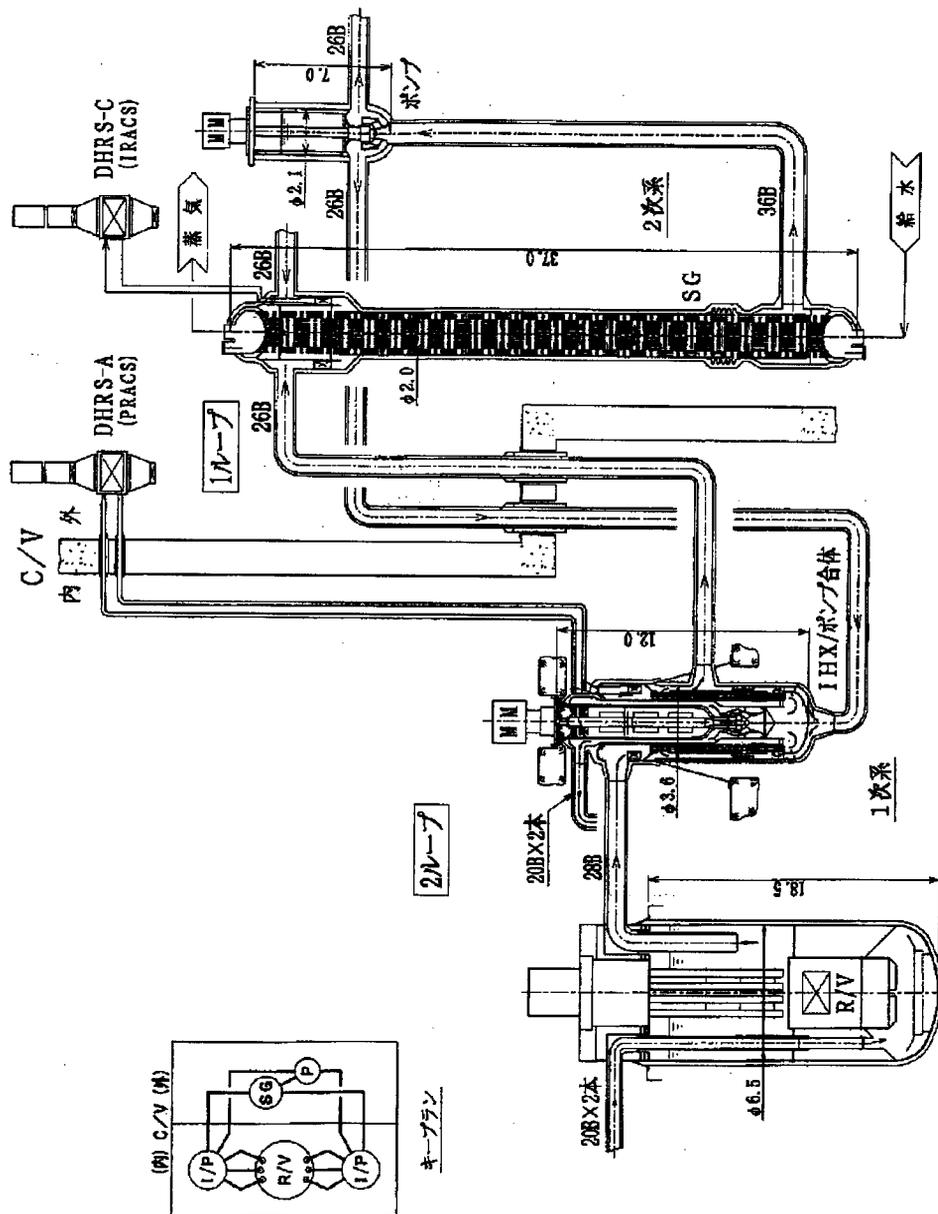


図 2.1-5 ナトリウム冷却中型炉の系統概念図

## 2.2 炉心燃料

ナトリウム冷却炉の炉心燃料仕様を表 2.1-2 に示す。平成 12 年度のナトリウム冷却大型炉の燃料取扱系は ABLE 型均質炉心を検討対象として EVST 方式で検討が行われた。使用済燃料および破損燃料の集合体 1 体当たりの発熱量を以下に示す。

- ・未減衰使用済燃料取扱時：18.1kW/体（3 集合体ポットでは 54.3kW/ポット）
- ・減衰後使用済燃料取扱時：4kW/体
- ・未減衰破損燃料取扱時：未設定（1 集合体あたり 54kW 程度まで可能性）
- ・減衰後破損燃料取扱時：1.6kW/体（暫定）

ナトリウム冷却中型炉は ABLE 型均質炉心を検討対象として水プール直接貯蔵方式で検討が行われた。使用済燃料の集合体 1 体当たりの発熱量は未減衰使用済燃料において 22kW/体である（水プール直接貯蔵方式のため減衰後使用済燃料の発熱量は検討していない）。

表2.2-1 ナトリウム冷却炉の炉心燃料仕様

項目	型式	単位	大型炉		中型炉		備考
			ABLE型径方向非均質炉心	内部径外型径方向非均質炉心	ABLE型径方向非均質炉心	ABLE型均質炉心	
1.基本仕様	炉心出力	MWe	1500	同左	500	同左	
	熱出力 (出口/入口)	MWt	3570	同左	1190	同左	
	原子炉出入口温度	°C	550/395	同左	同左	同左	
2.炉心仕様	運転サイクル長さ	月	約19	約17.5	約20	約17	
	形状寸法	m	約6.5	同左	約4.1	約4.0	
		m	約4.9	同左	約2.8	約2.6	
3.燃料集合体仕様	炉心構成(本数)	本	408	同左	316	120	
	内側炉心燃料	本	0	同左	266	102	
	外側炉心燃料	本	96	同左	0	0	
	内部フラング外	本	84	同左	198	126	
	径方向フラング外	本	36	同左	40	13	
	主炉停止棒	本	-	同左	15	6	
	後備炉停止棒	本	96	同左	222	144	
	中性子しゃへい体	本	1	同左	0	0	
	SUS集合体	本	90	同左	0	0	
	SUSしゃへい体	本	約400	同左	0	0	
	最大線出力	W/cm	約430	約400	約430	同左	
	型式	-	MOX、ダクト付き	同左	同左	同左	
	Pu富化度種類	1種類	MOX、ダクト付き	同左	2種類	同左	
	炉心取出平均燃焼度	MWD/t	147000	149000	149000	143000	
	全長	mm	4600	同左	4370	4600	
炉心高さ	mm	1000	同左	800	900		
ラッパ管外フラング外長さ (上/下)	mm	400/400	同左	350/350	350/350		
燃料ピン数	mm	198	同左	178.7	160.5	ハット間の数値	
燃料被覆管径	mm	331	380	271	217		
燃料被覆管材質	mm	8.8	7.9	8.5	8.5		
燃料ピン配列ピッチ	mm	ODS	同左	同左	同左		
スベークワイヤ径	mm	10.2	9.3	10.03	10.0		
スベークワイヤ巻付ピッチ	mm	1.34	同左	1.48	1.48		
集合体配列ピッチ	mm	200	同左	200	200		
最大燃焼集合体	mm	201	同左	179.7	161.5		
炉停止21日後	mm	29 (1.6倍)	22 (1.2倍)	18	22 (1.2倍)	16 (0.9倍)	大型均質炉を基準とした
炉停止4日後	mm	59 (1.6倍)	44 (1.2倍)	37	44 (1.2倍)	33 (0.9倍)	炉心部燃料重量比
4.使用済燃料の崩壊熱	炉心燃料	ハット数	4	同左	4	4	
	内部フラング外	ハット数	2	同左	2	2	
	径方向フラング外	ハット数	4	同左	4	4	
5.燃料取扱条件	制御棒	ハット数	1	同左	1	1	
	燃料交換本数	本	207	同左	250	106	
	UIS切込み幅	mm	496.3	同左	422.5	359.5	FHM7/カス通路でのCR案内管の間隔

注1)かっこ内の数値は切込み部の制御棒案内管(φ200mmと想定)の間隔。ただし、現状の中型炉・ABLE型均質炉心では炉内燃料取扱上、SASS導入管の設置位置が整合していない

### 2.3 EVST 方式の燃料取扱設備

EVST（炉外燃料貯蔵設備）方式を採用した場合の使用済燃料および破損燃料の取扱方法を図 2.3-1 および図 2.3-2 に示す。使用済燃料は炉心から炉内中継装置（図 2.3-3 参照）まで燃料交換機により移送され、炉内中継装置に設置された複数集合体ポット（平成 12 年度検討では 3 集合体ポット）に入れられる。ナトリウム入り状態の複数集合体ポットに入った燃料は、燃料出入機（図 2.3-4）により原子炉内の炉内中継装置から EVST（図 2.3-5 参照）に移送される。この際は移送時間が短くポットの熱容量も大きいことから無冷却状態での移送を行う。EVST で減衰待ちした後、裸燃料の状態では燃料出入機により乾式燃料洗浄を行った後、直接冷却（アルゴンガスによる循環冷却）しつつ、燃料昇降装置（図 2.3-6 参照）に移送される。燃料昇降装置では燃料出入機から受け取った燃料を冷却しつつ、水プール（図 2.3-7 参照）に装荷する。水プールで搬出待ちした燃料は水キャスクに入れられ、プラントから搬出される。したがって、除熱上は通常取扱時には厳しい条件はないことが考えられるが、事故時等で冷却が必要な場合には複数集合体ポットの除熱性が課題になる。また、裸燃料の移送では常に強制冷却が必要であり、取り出し時の崩壊熱レベルを上げる場合には除熱性が課題となる。

なお、新燃料は新燃料キャスク取扱装置でキャスクから取り出され燃料出入機により新燃料貯蔵ラックに一時貯蔵された後、EVST に移送される。EVST に貯蔵された新燃料は使用済燃料と入れ替わりに複数集合体ポットに装荷され、炉内に運ばれる。炉内での取扱いは使用済燃料と逆の手順となる。

破損燃料は炉内では使用済燃料と同じルートで炉内中継装置に移送された後、複数集合体ポットに入れられ、燃料出入機により間接冷却されながら燃料検査装置（図 2.3-8）に移送される。燃料検査装置では間接冷却しつつ燃料の破損状態を検査する。状態検査が終了した破損燃料は、燃料出入機により間接冷却しつつ EVST に移送され、減衰待ち貯蔵後に破損燃料キャスク（He キャスク）により搬出される。破損燃料の取扱いにおいては、複数集合体ポットに 1 体の高発熱の破損燃料を入れた状態で取扱うため、移送時および検査時に間接冷却が必要と考えられ、その除熱性が課題となる。

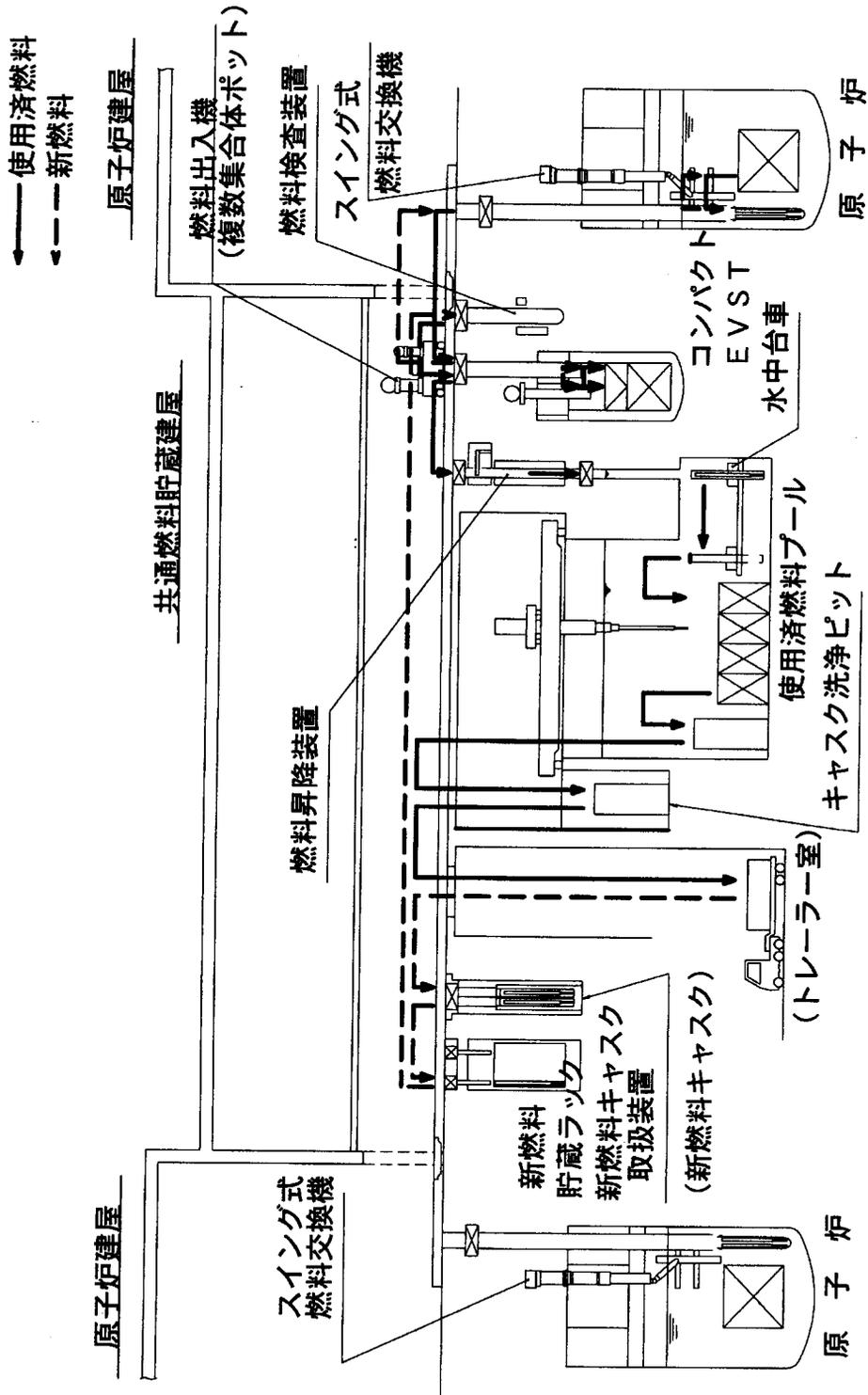


図 2.3-1 使用済燃料輸送経路 (EVST 方式)

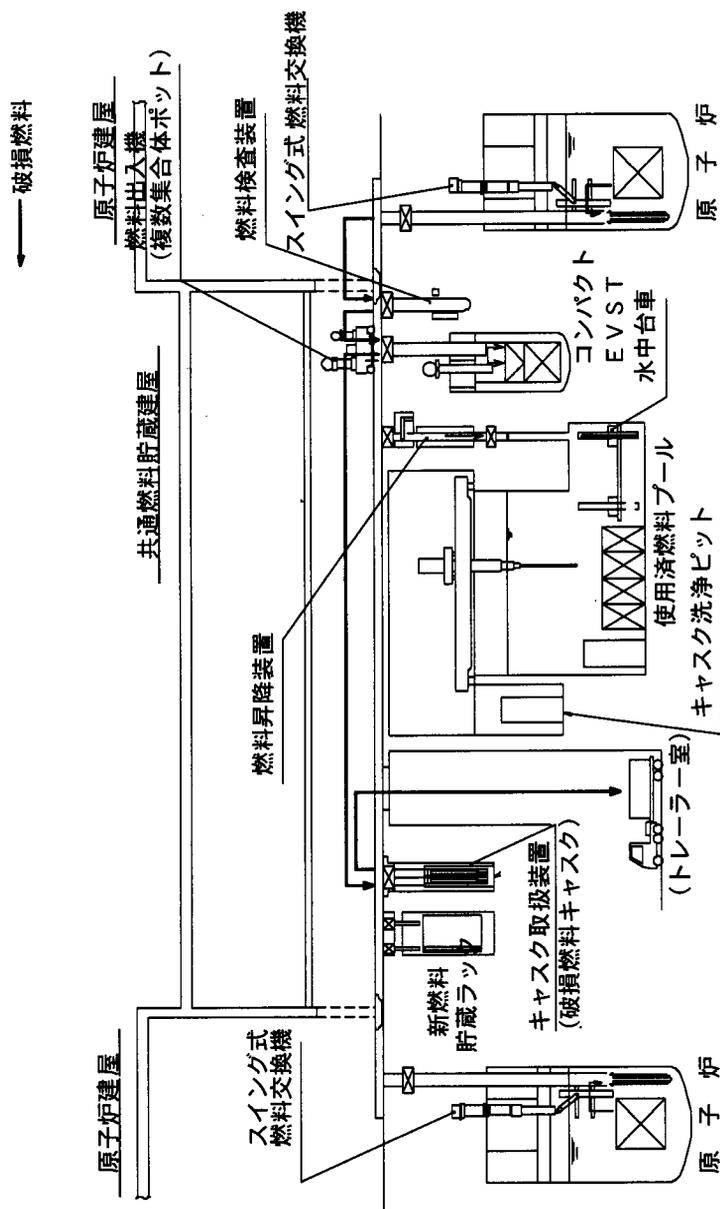
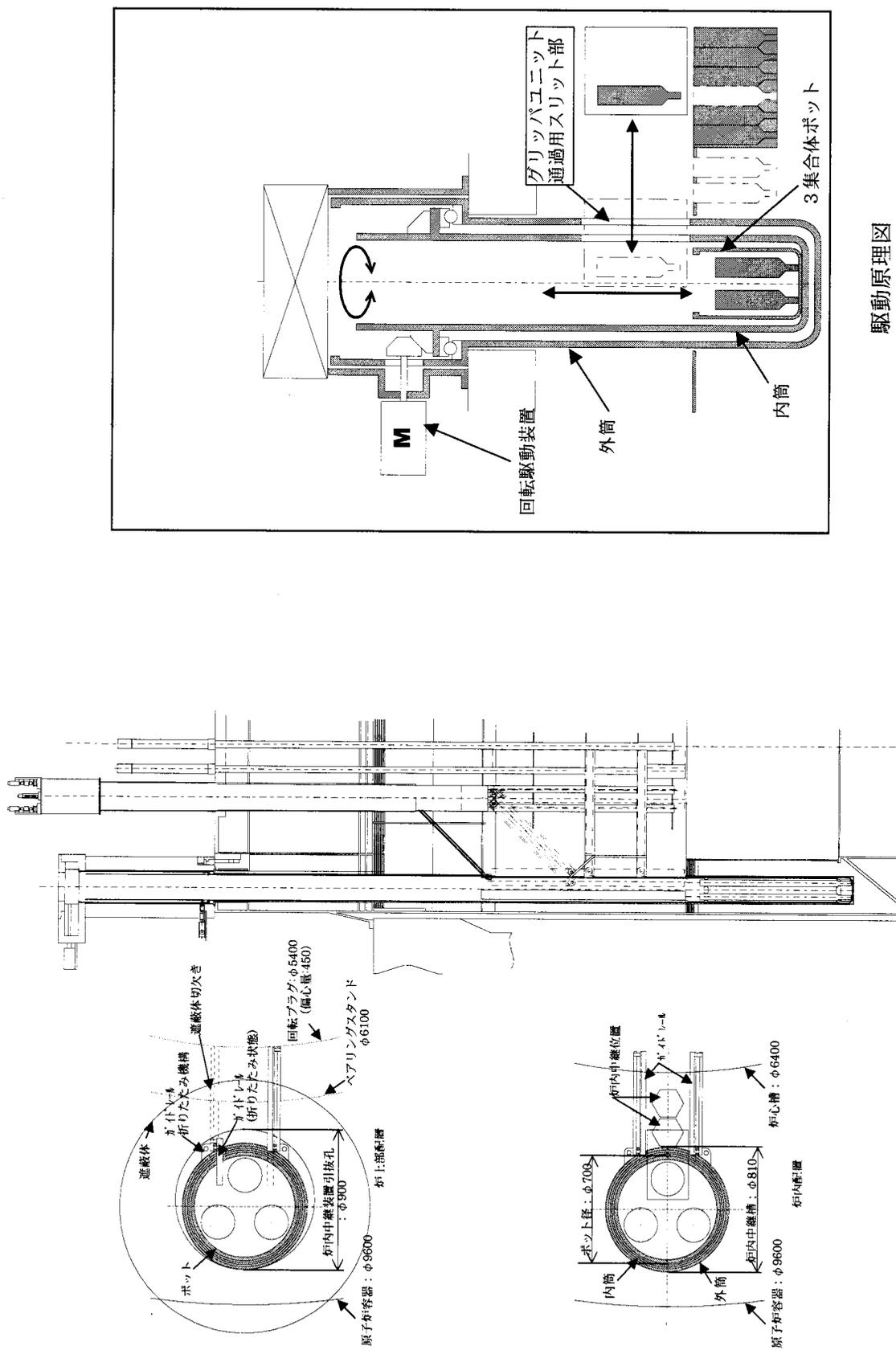


図 2.3-2 破損燃料輸送経路 (EVST 方式)



駆動原理図

図 2.3-3 炉内中継装置概念図 (EVST 方式)

炉内中継装置概念図

**冷却系構成**

3 集合体取扱本体側（未減衰燃料）

- ・ 間接冷却系 100%×2 系統（通常時 2 基とも待機）

1 集合体本体側（減衰後燃料）

- ・ 直接冷却系 100%×2 系統
- ・ 空気系（間接冷却系）100%×2 系統：切り替え弁で 3 集合体取扱側とブロワ共用（通常時も各 1 基運転、残り各 1 基は待機）

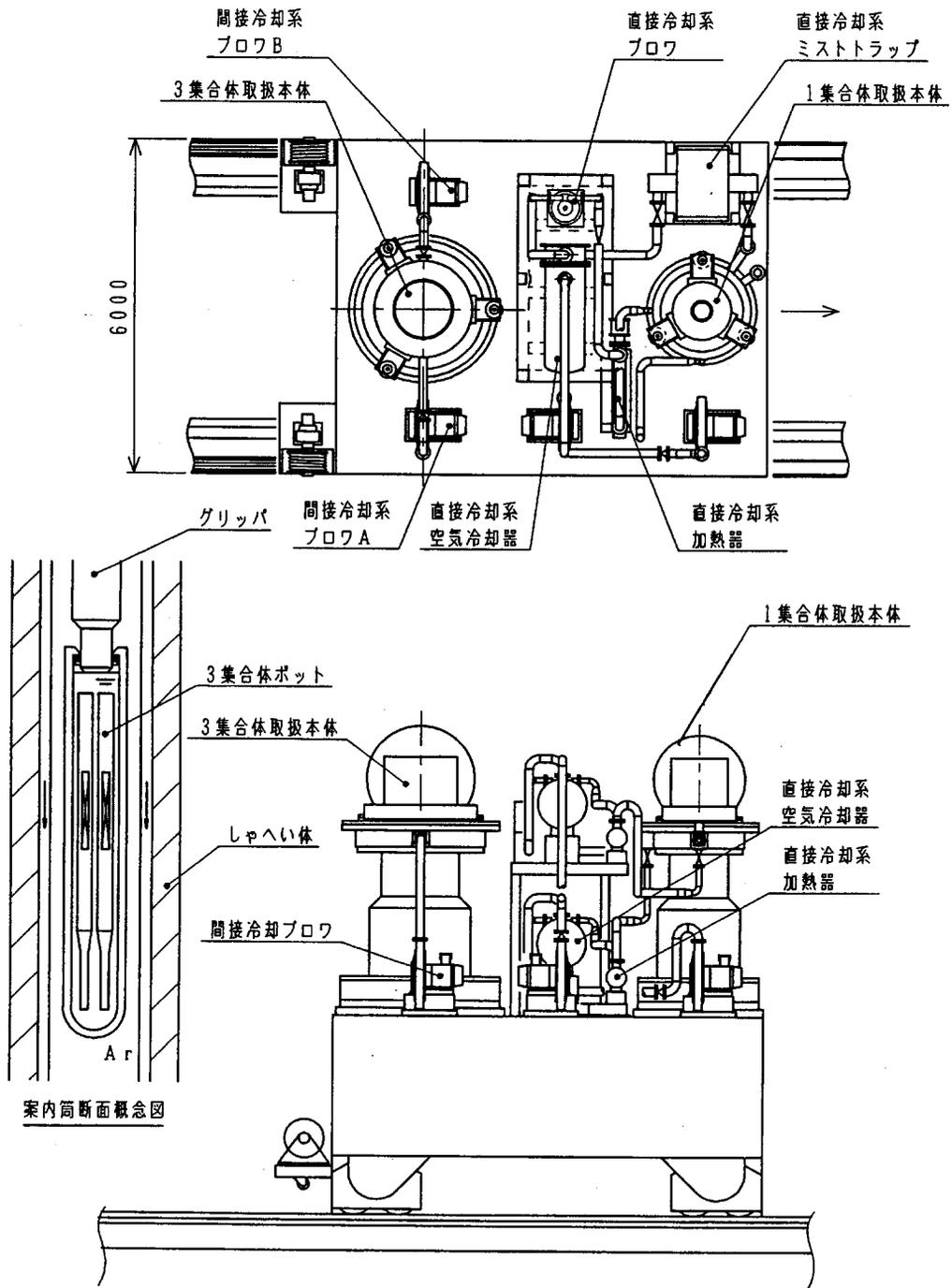


図 2.3-4 燃料出入機概念図 (EVST 方式)

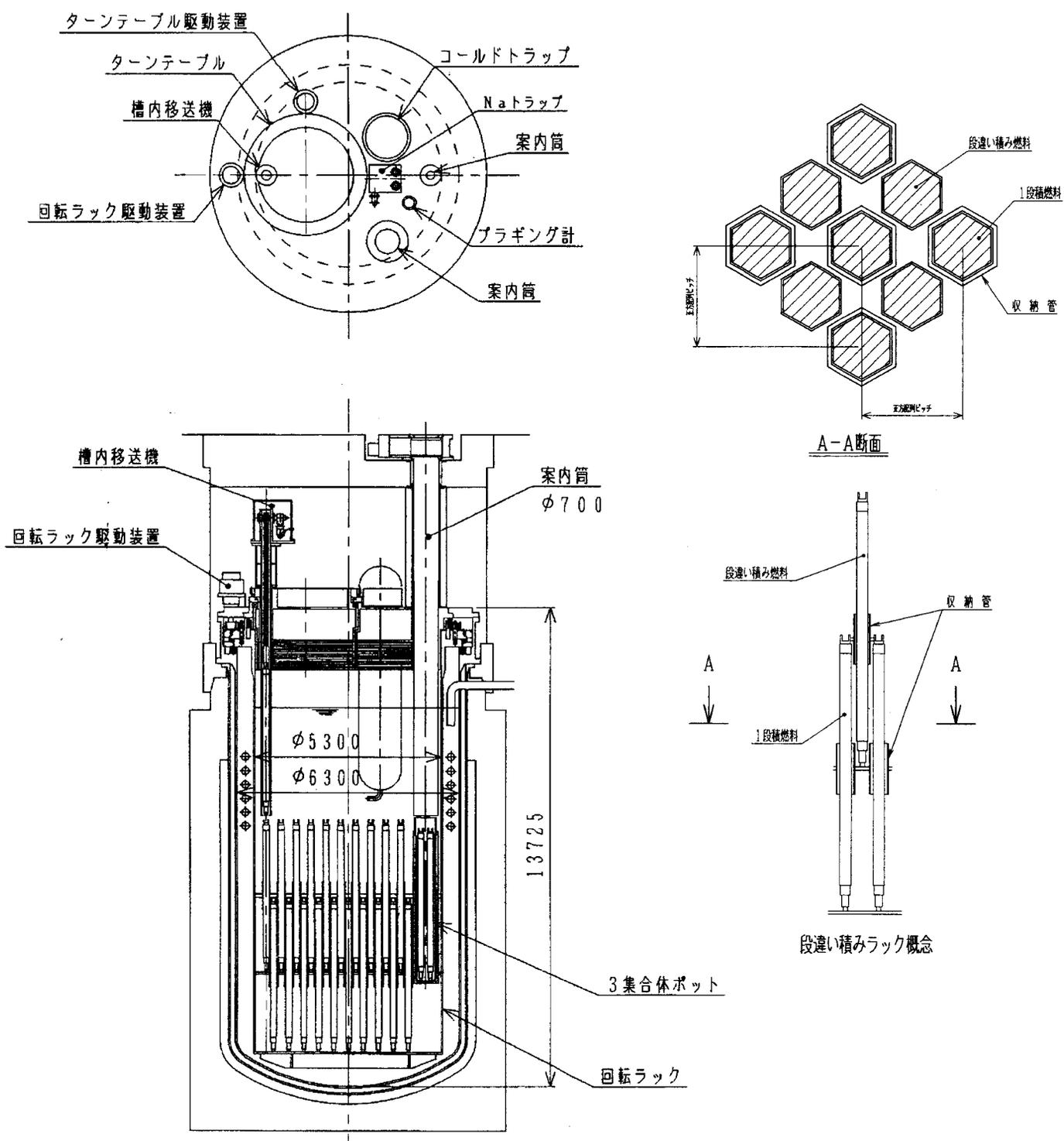


図 2.3-5 炉外燃料貯蔵槽概念図 (EVST 方式)

冷却系構成

- ・直接冷却系 100%×2 系統
- ・空気系（間接冷却系）100%×2 系統  
（通常時も各 1 基運転、残り各 1 基は待機）

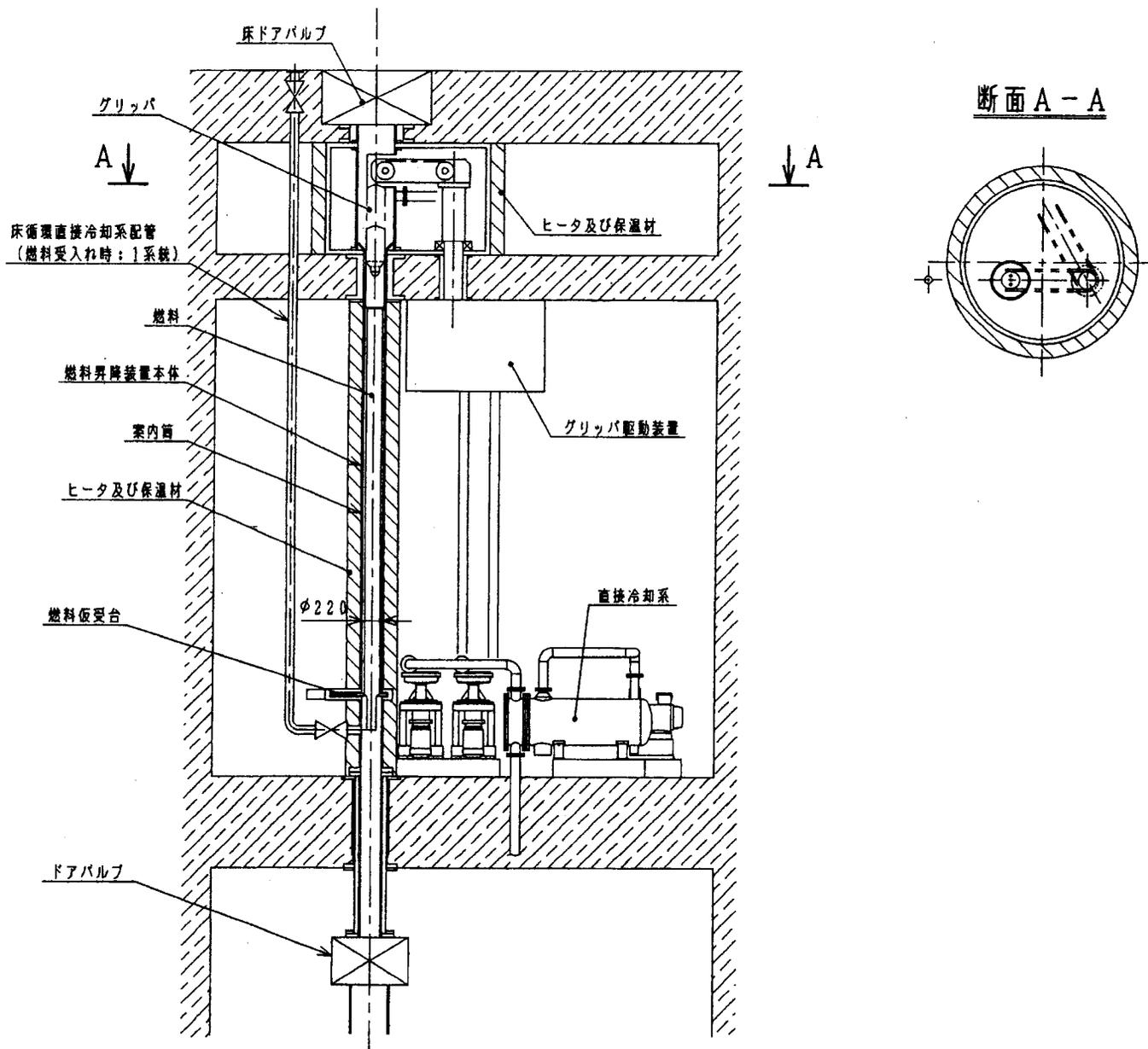


図 2.3-6 燃料昇降装置概念図 (EVST 方式)

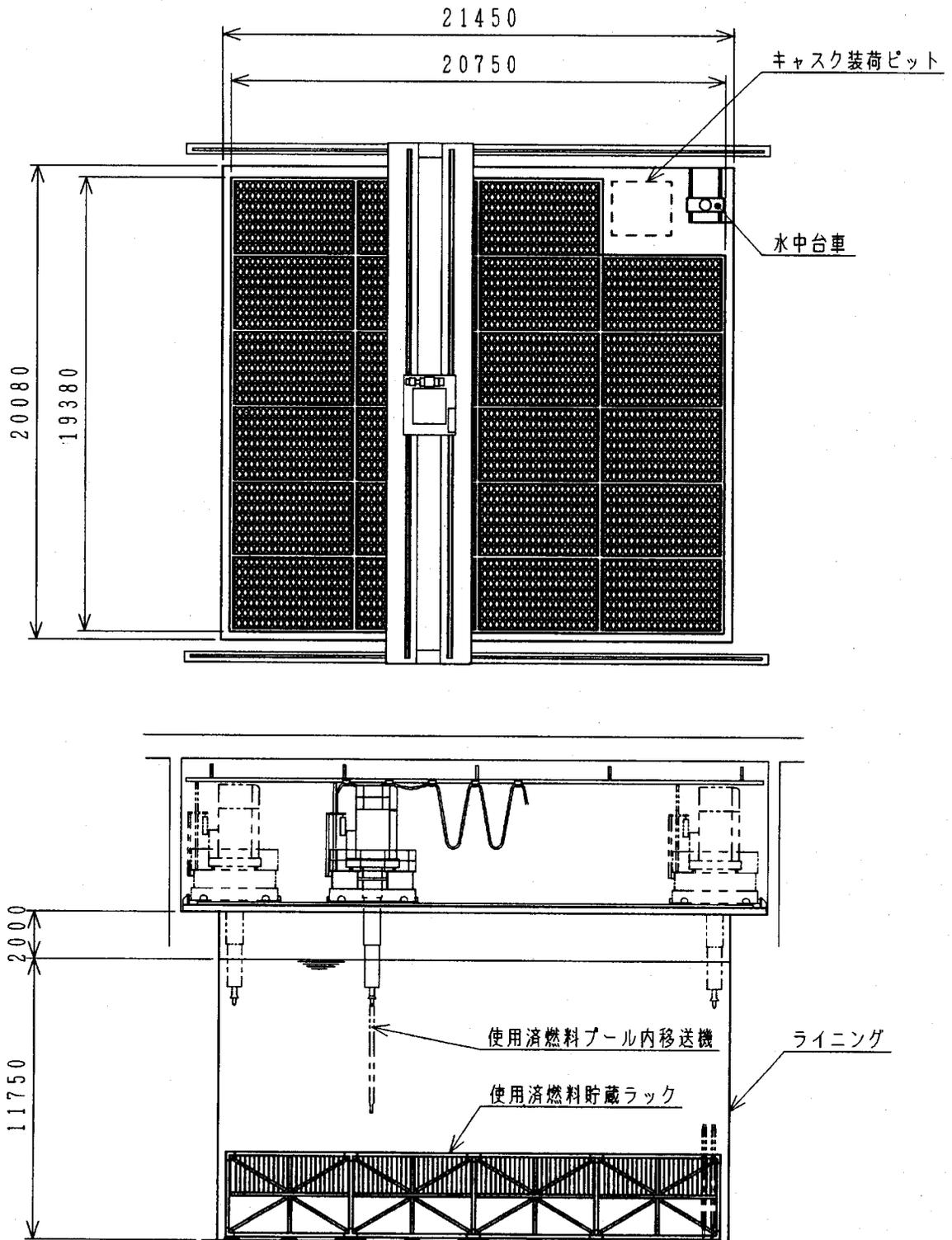


図 2.3-7 水プール概念図 (EVST 方式)

冷却系構成

- ・間接空気冷却系 100%×2 系統  
(通常時は 1 系統運転、残り各 1 基は待機)

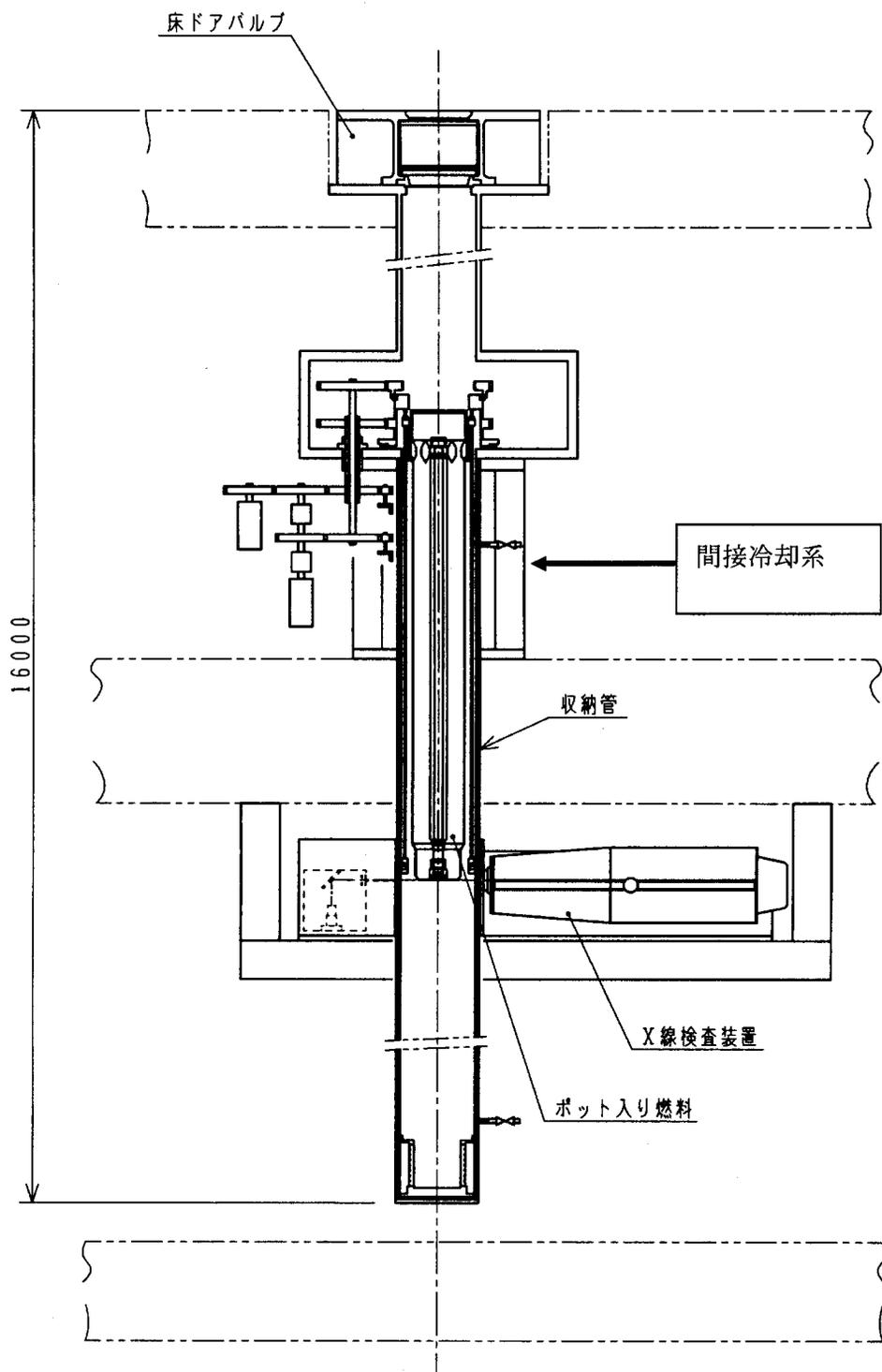


図 2.3-8 破損燃料検査装置概念図 (EVST 方式)

## 2.4 水プール直接貯蔵方式の燃料取扱設備

水プール直接貯蔵方式の使用済燃料および破損燃料の取扱方法を図 2.4-1 および図 2.4-2 に示す。使用済燃料は炉心から炉内中継装置（図 2.3-3 参照）まで燃料交換機により移送され、炉内中継装置の複数集合体ポット（平成 12 年度検討では 3 集合体ポット）に入れられる。ナトリウム入り状態の複数集合体ポットに入った燃料は、燃料出入機（図 2.4-3 参照）により原子炉内の炉内中継装置からナトリウム予熱槽（図 2.4-4 参照）に移送される。この際は移送時間が短くポットの熱容量も大きいことから無冷却状態での移送を行う。ナトリウム予熱槽にポットを装荷し燃料を 400℃まで予熱した後、未減衰状態（18.1kW/体）の裸燃料を 1 体ずつ回転移送機（図 2.4-5 参照）により吊り上げ、乾式燃料洗浄を行う。その後、直接冷却（アルゴンガスによる循環冷却）しつつ、燃料昇降装置（図 2.4-6 参照）に移送する。燃料昇降装置では燃料出入機から受け取った燃料を冷却しつつ、動的機器の故障により昇降停止して燃料エントランスノズルが水中位置で停止による冷却不能となる確率を最小限とするため水プール（図 2.4-7 参照）からの注水により水浸漬した後、水プールに装荷する。水プールで搬出待ちした燃料は水キャスクに入れられ、プラントから搬出される。したがって、除熱上は複数集合体ポット移送状態では EVST 方式と取扱い上は同等であるが、裸燃料取扱時は未減衰状態のまま強制冷却しつつ移送することから、冷却停止時には短時間で過熱に至る恐れがあり、除熱性が課題になる。

なお、新燃料は新燃料キャスク取扱装置でキャスクから取り出され燃料出入機により新燃料貯蔵ラックに一時貯蔵された後、ナトリウム予熱槽に移送される。ナトリウム予熱槽に貯蔵された新燃料は使用済燃料と入れ替わりに複数集合体ポットに装荷され、炉内に運ばれる。炉内での取扱いは使用済燃料と逆の手順となる。

破損燃料は炉内では使用済燃料と同じルートで炉内中継装置に移送された後、複数集合体ポットに入れられ、燃料出入機により間接冷却されながら燃料検査装置（EVST 方式の燃料検査装置と同等）に移送される。燃料検査装置では間接冷却しつつ燃料の破損状態を検査する。状態検査が終了した破損燃料は、燃料出入機により間接冷却しつつナトリウム予熱槽に移送され、減衰待ち貯蔵後に破損燃料キャスク（He キャスク）により搬出される。破損燃料の取扱いは減衰待ち貯蔵場所は異なるものの EVST 貯蔵方式と同等であり、課題も同様と考えられる。

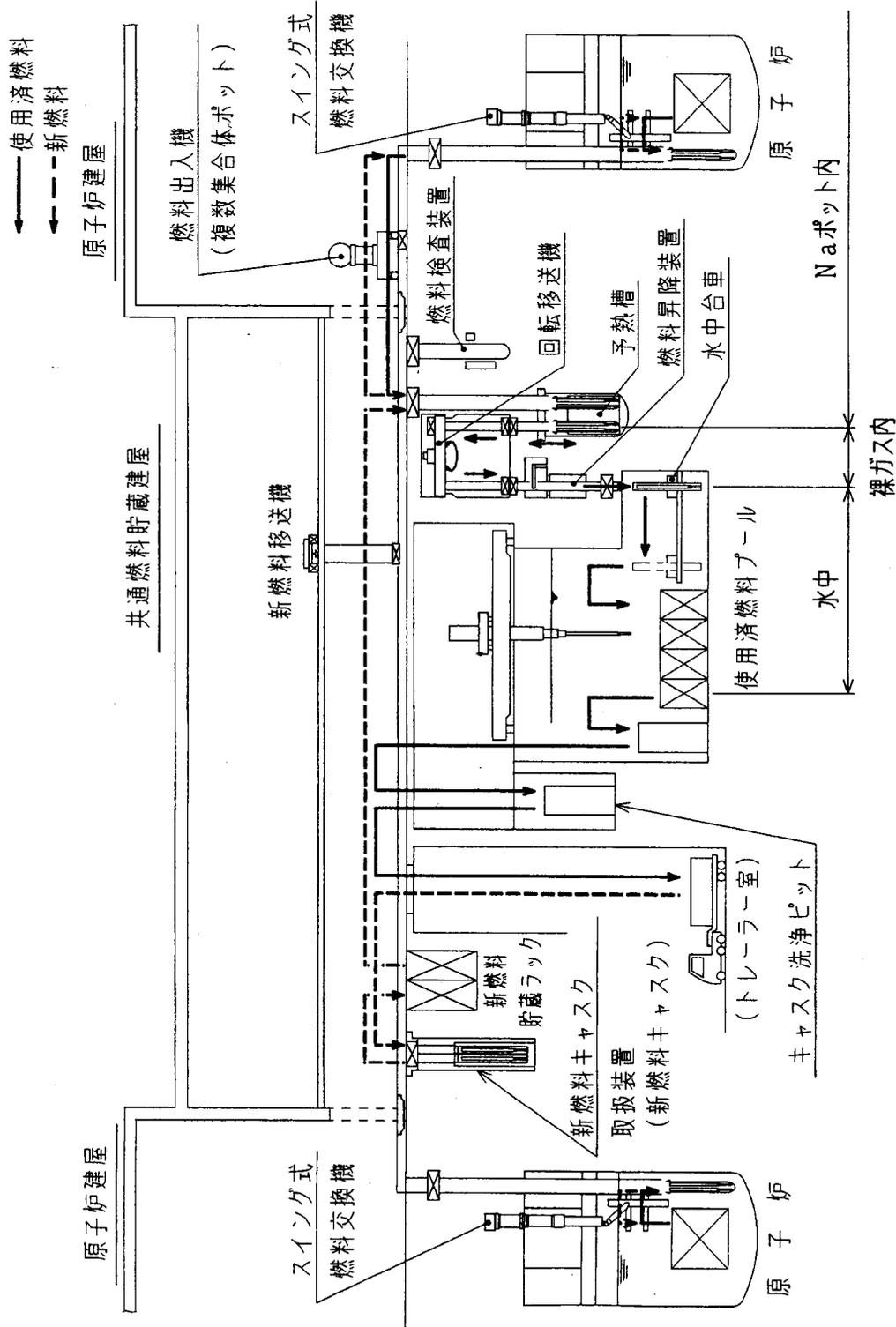


図 2.4-1 使用済燃料輸送経路 (水プール直接貯蔵方式)

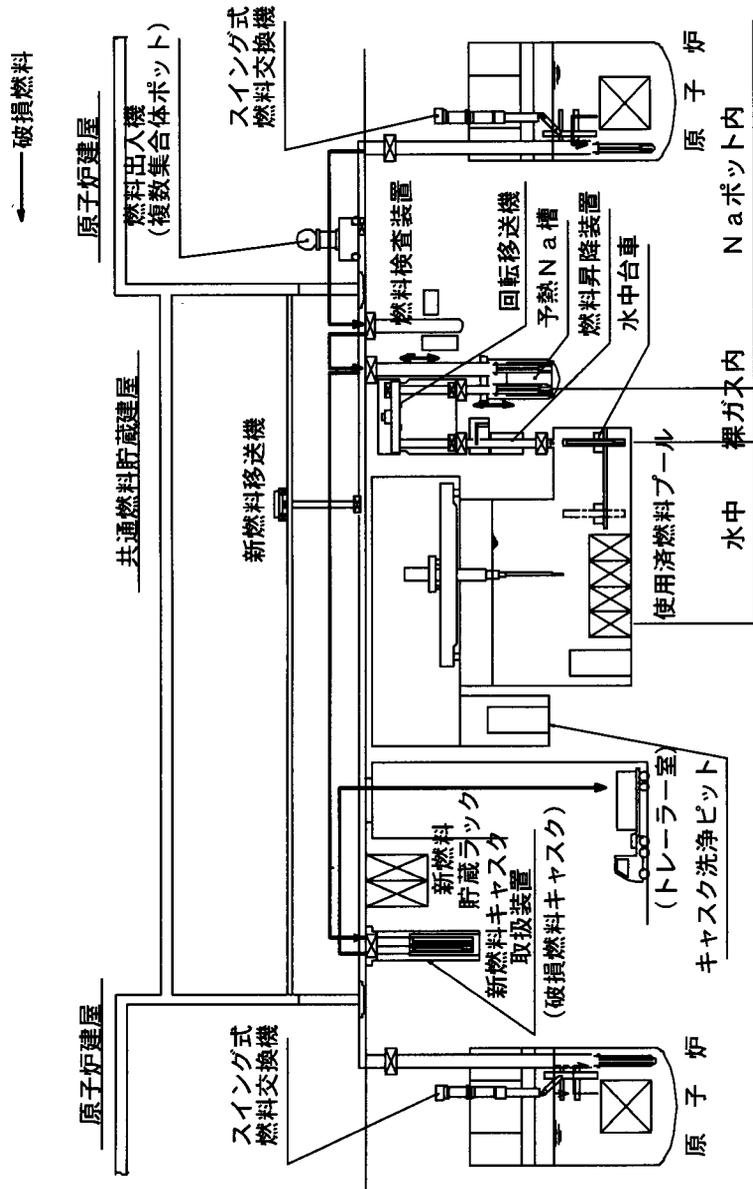


図 2.4-2 破損燃料輸送経路 (水プール直接貯蔵方式)

冷却系構成  
 ・空気系（間接冷却系）100%×2系統  
 （通常時は2系統とも待機）

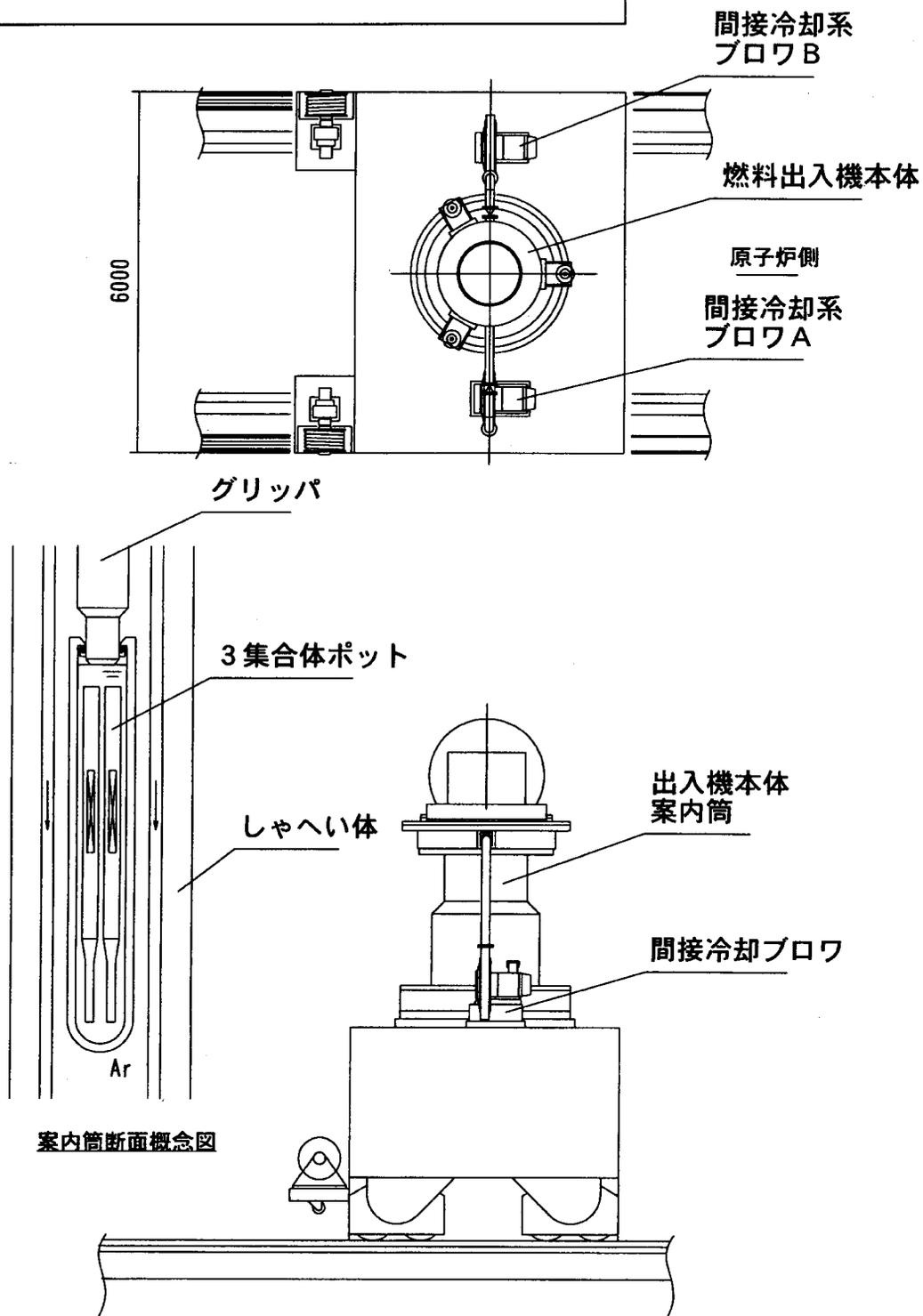
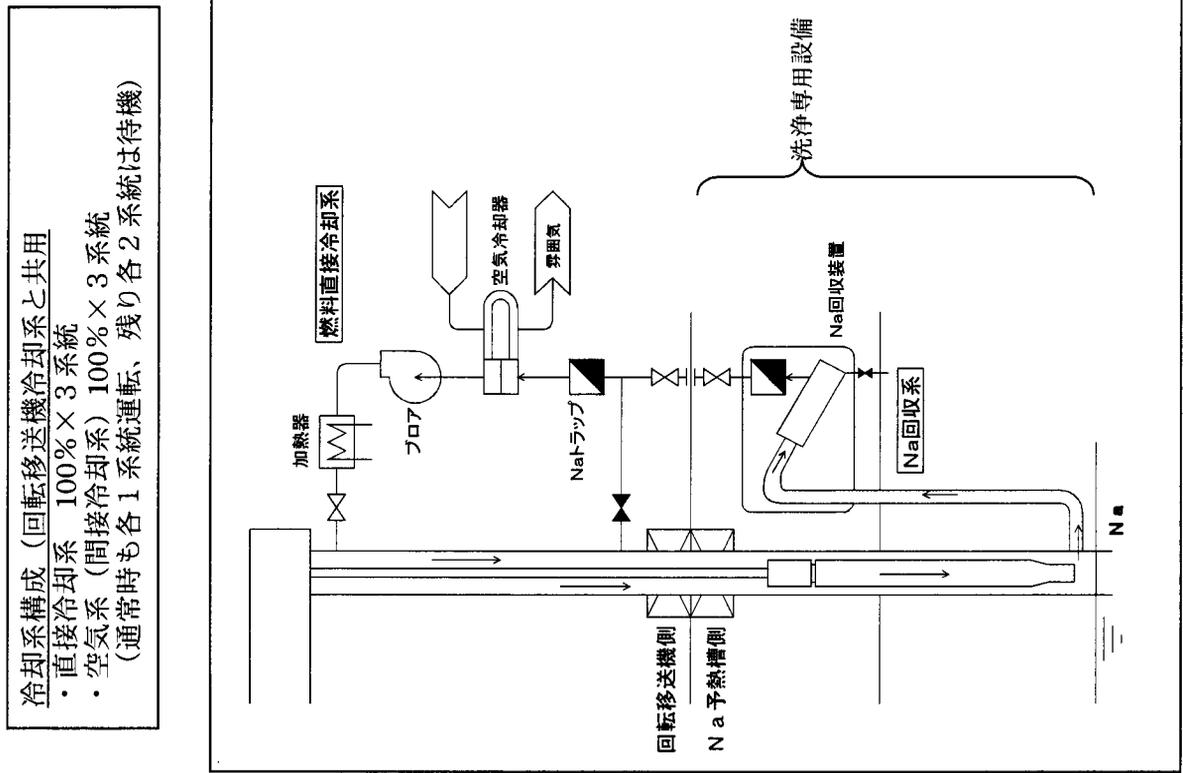
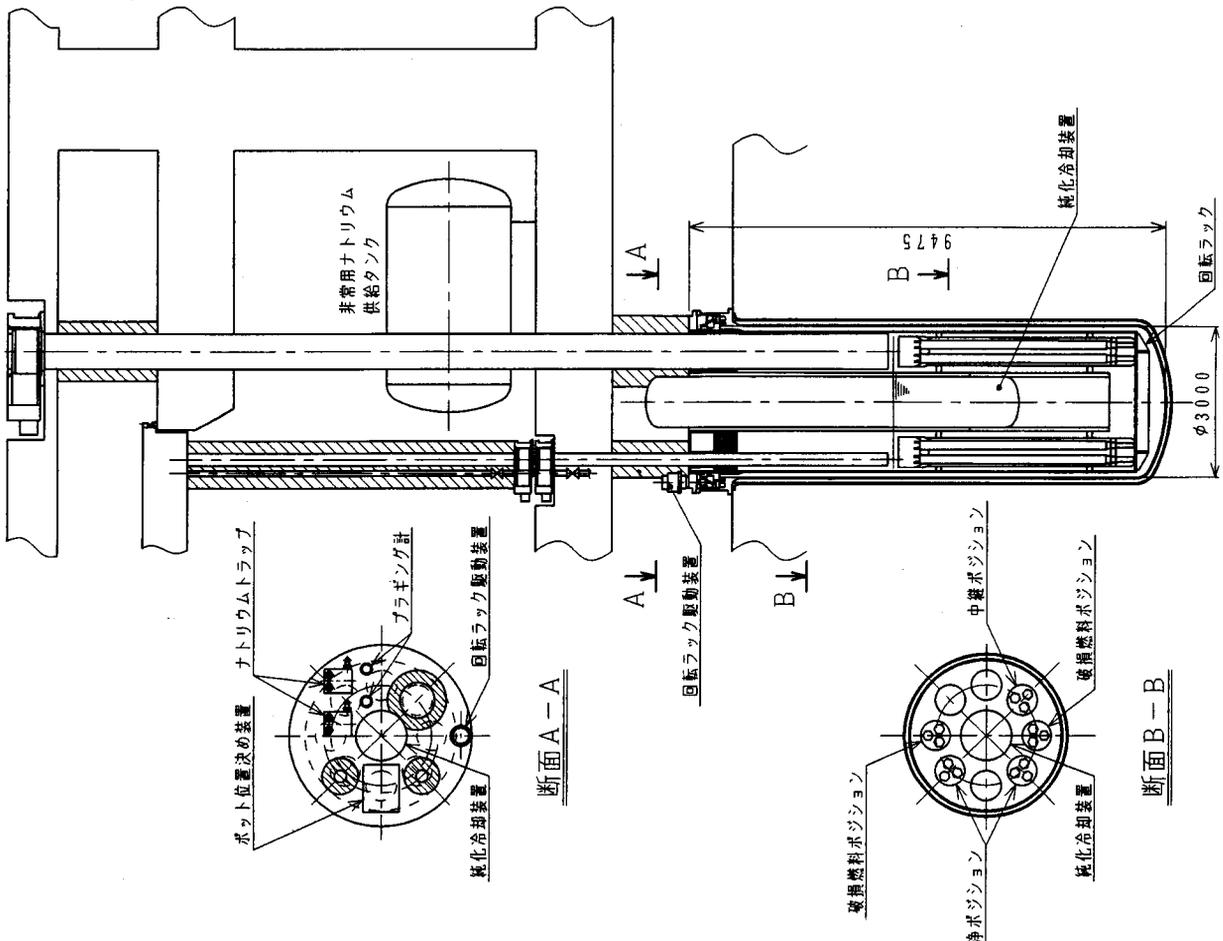


図 2.4-3 燃料出入機概念図（水プール直接貯蔵方式）



冷却系構成 (回転移送機冷却系と共用)  
 ・直接冷却系 100% × 3 系統  
 ・空気系 (間接冷却系) 100% × 3 系統  
 (通常時も各 1 系統運転、残り各 2 系統は待機)

図 2.4-4 ナトリウム予熱槽概念図 (水プール直接貯蔵方式)

冷却系構成  
 ・直接冷却系 100%×3系統  
 ・空気系（間接冷却系）100%×3系統  
 （通常時も各1系統運転、残り各2系統は待機）

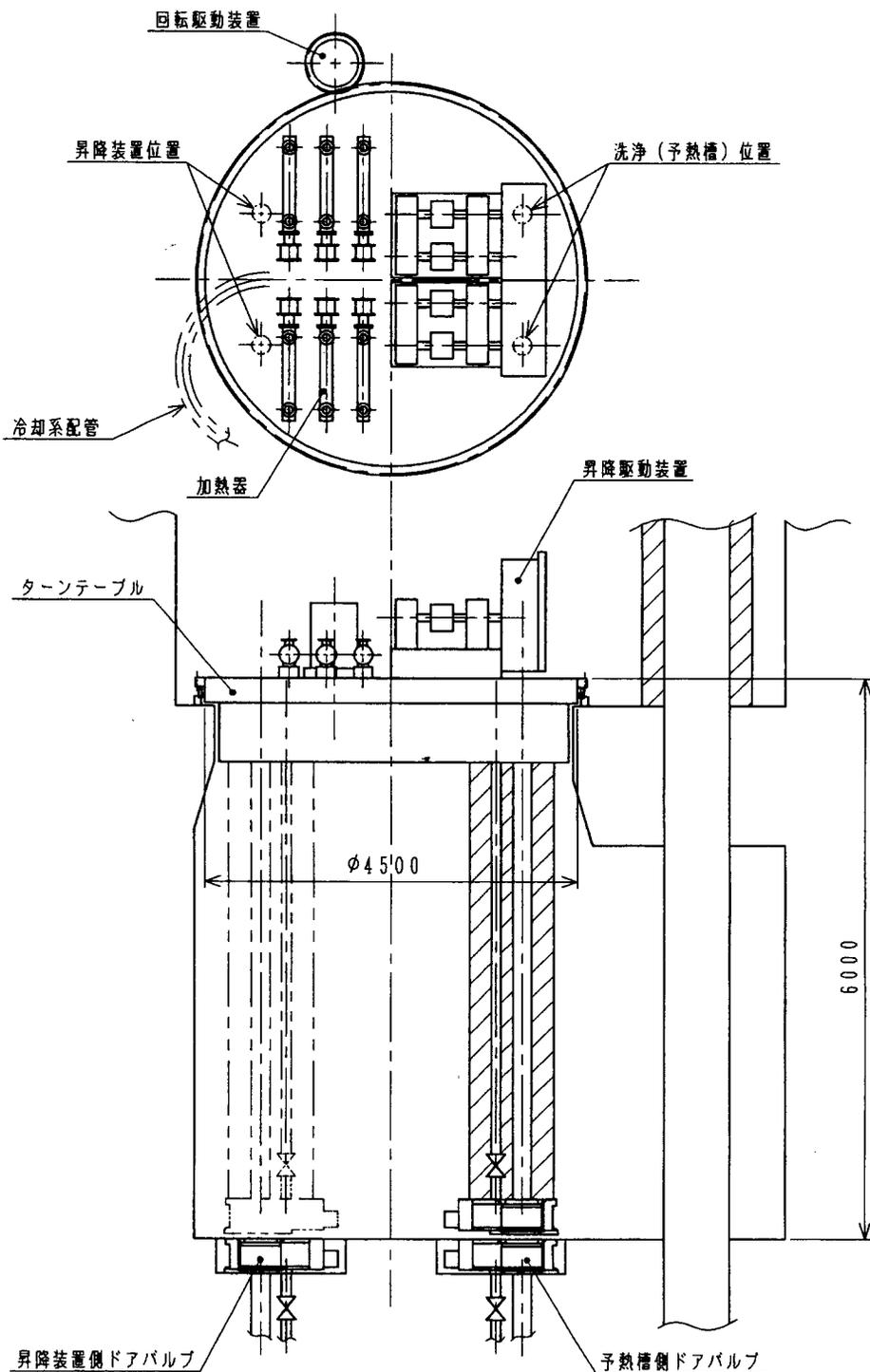


図 2.4-5 回転移送機概念図（水プール直接貯蔵方式）

**冷却系構成**  
 ・直接冷却系 100%×3 系統  
 ・空気系（間接冷却系）100%×3 系統  
 （通常時も各 1 系統運転、残り各 2 系統は待機）

**断面 A - A**

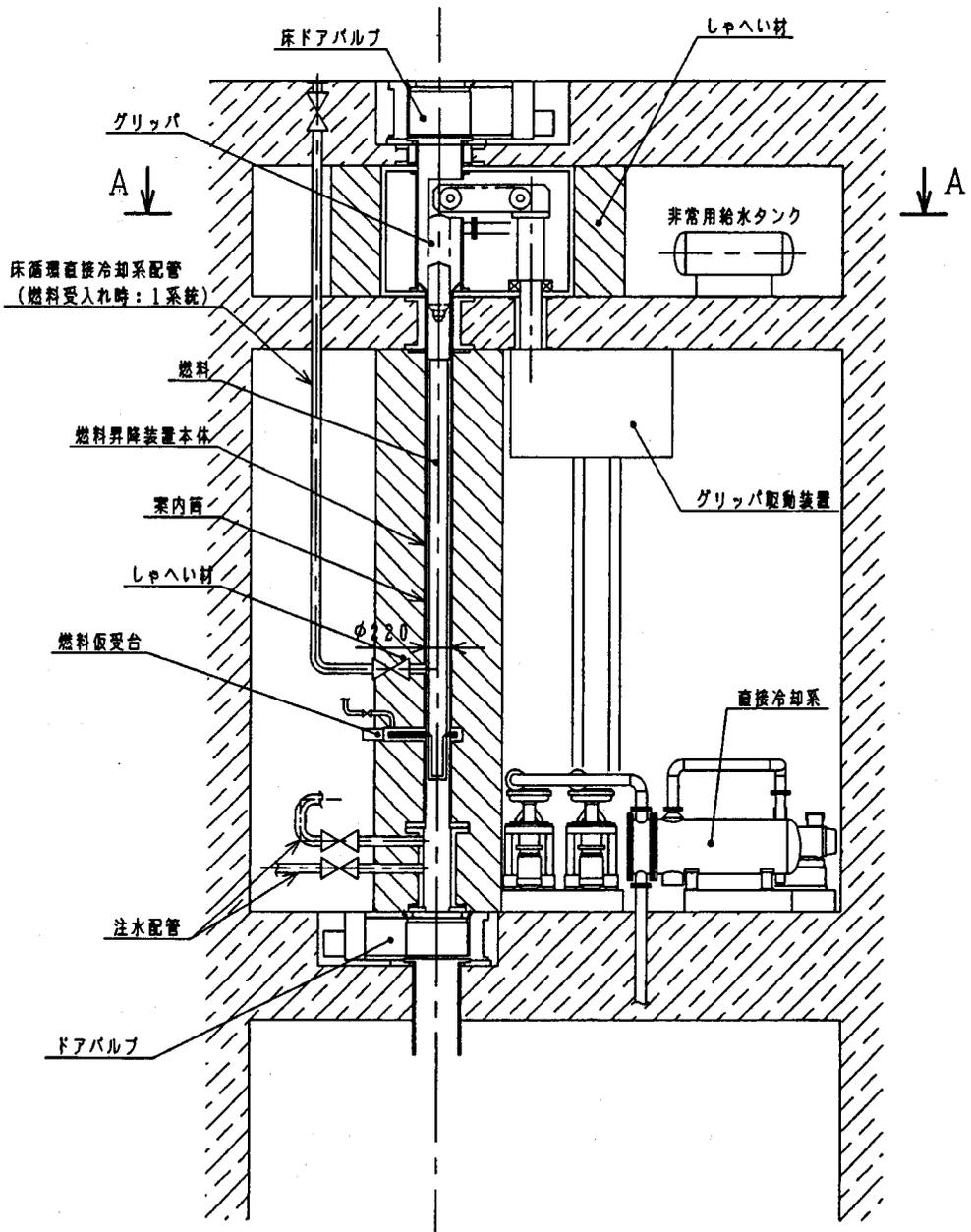
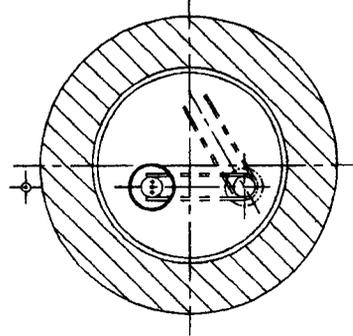


図 2.4-6 燃料昇降装置概念図（水プール直接貯蔵方式）

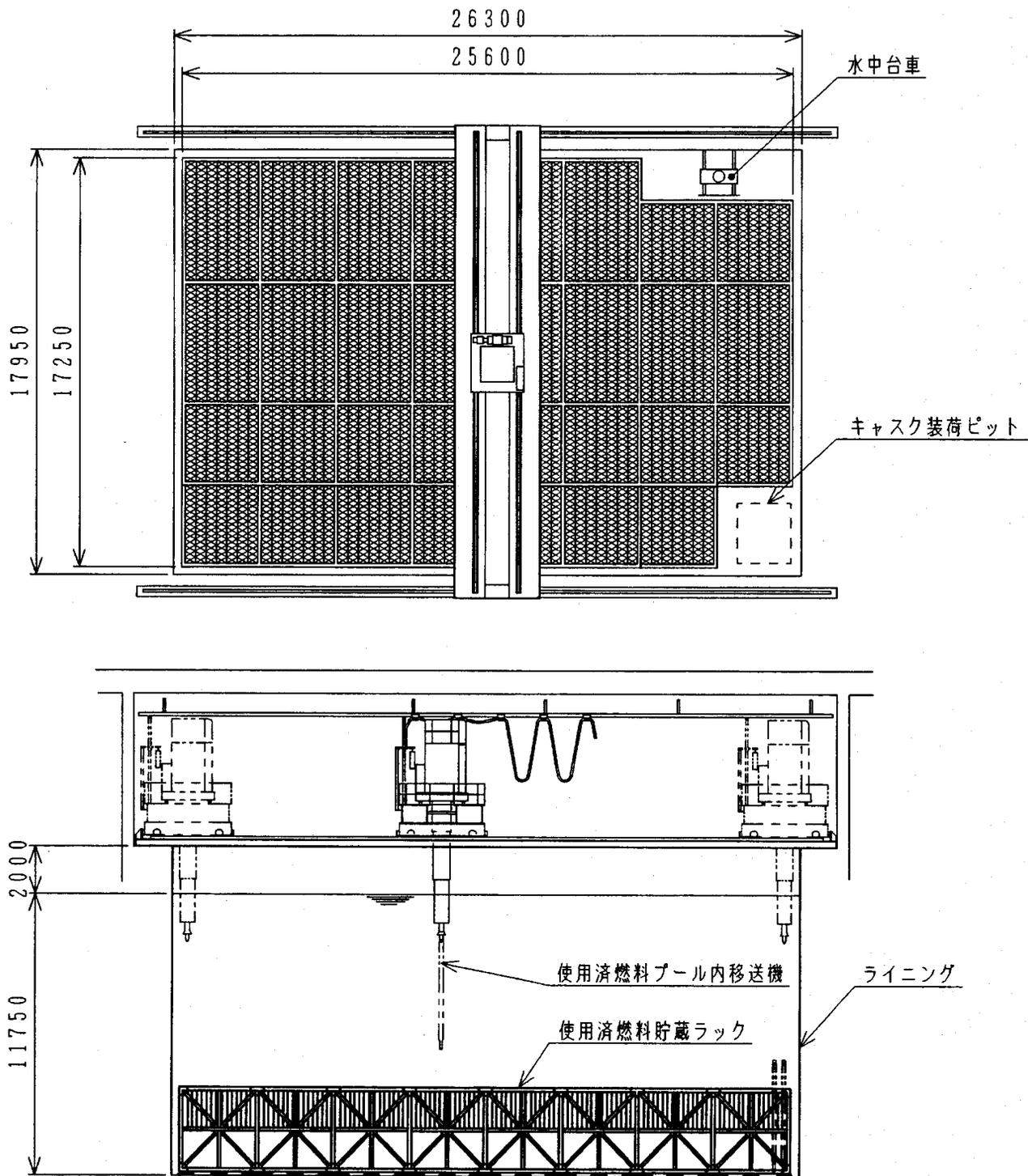


図 2.4-7 水プール概念図 (水プール直接貯蔵方式)

### 3. 除熱方法および事故事象の整理

#### 3.1 除熱方法の整理

##### 3.1.1 EVST 方式の除熱方法

EVST 方式の場合の燃料取扱時の除熱方法を整理した。整理結果を表 3.1.1-1 に示す。未減衰燃料の移送は、断熱温度上昇でも移送時間は 20 分程度と短く制限温度まで余裕があると想定されるため、未減衰燃料の移送は基本的に無冷却で行い、移送系が停止する事象が発生した場合に限って炉内中継装置、EVST 案内筒間接冷却系、または燃料出入機の間接冷却系を起動して冷却する。

EVST において崩壊熱を減衰された燃料は裸で輸送されるため直接冷却が常に必要なことから、燃料出入機で吊り上げ、吊り下げする際にも床側の設備との間に循環系を確保し、常に直接冷却ガスを確保しつつ移送する。

新しい概念を採用している複数集合体ポット移送時の除熱性については確認が必要であるが、裸燃料の取扱は EVST において減衰後に行われるため使用済燃料の通常取扱中に除熱性が問題になる可能性はない。

EVST 方式の場合の破損燃料取扱時の除熱方法を表 3.1.1-2 に整理した。複数集合体ポットで高発熱燃料を 1 体のみ移送するため、早期取り出しを狙った場合には間接冷却を活用することで取り出し時期の短縮が可能である。破損燃料の検査時間が長くなることを考慮して、常に間接冷却ガスを確保することで除熱性を確保する。このため、複数集合体ポットに 1 体の燃料を入れた体系での除熱性が課題となる。減衰後の破損燃料の取扱いは He ガスキャスクで搬出するため、自然冷却が可能なレベルまで EVST で崩壊熱を減衰する。このため、減衰待ち以降の取扱いは除熱性の課題はない。

EVST 方式の場合の燃料取扱系設備のうち冷却機能を有する機器についての冷却系の系統図を以下のとおり示す。

#### ① 炉内中継装置

非常用電源に接続した 2 系統のプロワによる間接冷却系で構成される(図 3.1.1-1)。

#### ② 燃料出入機

複数集合体ポット移送本体は非常用電源に接続した 2 系統の間接冷却系による間接冷却、裸燃料を取り扱う本体は非常用電源に接続した 2 系統の直接冷却系(アルゴンガス循環系)とその直接冷却系を冷却する 2 系統の間接冷却系により構成され

る（図 3.1.1-2）。

③ 炉外燃料貯蔵設備

貯蔵槽内は自然循環により冷却され、貯蔵槽外の冷却系は 3 系統の強制循環冷却系とそれを冷却する空気冷却系により構成される（図 3.1.1-3）。

④ 燃料昇降装置

非常用電源に接続した 2 系統の直接冷却系（アルゴンガス循環系）とその直接冷却系を冷却する 2 系統の間接冷却系により構成される（図 3.1.1-4）。

⑤ 水プール

2 基の循環ポンプと 2 基の熱交換器を有する 1 系統の冷却系により構成される。除熱容量は 1.8MW である（図 3.1.1-5）。

⑥ 破損燃料検査装置

非常用電源に接続した 2 系統の間接冷却系による間接冷却系により構成される（図 3.1.1-6）。

表 3.1.1-1 使用済燃料の除熱方法 (EVST 方式)

移送範囲	移送動作	移送設備	冷却設備	冷却体系	備考
未減衰燃料取扱時 減衰後燃料取扱時	炉内中継位置 (炉内中継装置) →炉上部位置 (燃料出入機)	燃料出入機	炉内中継装置間冷却系 燃料出入機間冷却系 EVST案内筒間冷却系	無冷却	移送停止時のみ間接冷却。 断熱温度上昇でも移送時間 20 分程度のため、問題ない。 事故時の除熱性は別途評価必要
	炉上部位置 (燃料出入機) →EVST上部位置 (燃料出入機)				
	EVST上部位置 (燃料出入機) →EVST中継位置				
	EVST中継位置 →EVSTラック EVSTラック →EVST中継位置	吊り上げ、回転、吊り下ろし	EVST槽内移送機、回転ラック	Na 冷却 — (EVST冷却系)	EVST内Na中の移送のため、冷却性に課題はない。
	EVST中継位置 →EVST上部洗浄位置 EVST上部洗浄位置 →EVST上部位置 (燃料出入機)				
	EVST上部位置 (燃料出入機) →燃料昇降装置上部位置 (燃料出入機)	燃料出入機	燃料出入機直接冷却系 + 床側 Na 回収系 燃料出入機直接冷却系	直接冷却	燃料出入機直接冷却系と床側 Na 回収系を接続し、昇降時も直接冷却系の循環冷却ガスを確保。同上。洗浄位置で中温ガスを洗浄後、吊り上げ。出入機の循環系の弁を開放してから床側Na回収系を隔離。 燃料出入機直接冷却系により直接冷却。
	燃料昇降装置上部位置 →燃料昇降装置				
	燃料昇降装置 →水プール (水中台車)				
	燃料昇降装置上部位置 →燃料昇降装置	吊り下ろし	燃料昇降装置	燃料出入機直接冷却系 + 床側循環系 燃料昇降装置冷却系	燃料出入機直接冷却系と床側循環系を接続し、昇降時も直接冷却系の循環冷却ガスを確保。 燃料昇降装置冷却系を起動後、出入機直接冷却系を切り離し。ガス冷却しつつ水面まで下降。 水中を水中台車まで下降
	燃料昇降装置上部位置 (燃料出入機) →燃料昇降装置上部位置 (燃料出入機)				
燃料昇降装置上部位置 →燃料昇降装置	吊り下ろし	燃料昇降装置	燃料昇降装置冷却系	水冷却	水中を水中台車まで下降
燃料昇降装置上部位置 (燃料出入機) →燃料昇降装置上部位置 (燃料出入機)					

表 3.1.1-2 破損燃料の除熱方法 (EVST 方式)

移送範囲	移送動作	移送設備	冷却設備	冷却体系	備考
未減衰燃料取扱時	炉内中継位置 (炉内中継装置) → 炉上部位置 (燃料出入機)	燃料出入機	炉内中継装置間 接冷却系 燃料出入機間接 冷却系	間接冷却	取り出し時崩壊熱にもよるが、基本的に間接冷却しつつ移送する。 事故時の除熱性は別途評価必要
	炉上部位置 (燃料出入機) → 燃料検査装置上部位置 (燃料出入機)				
	燃料検査装置上部位置 (燃料出入機) → 燃料検査装置				
	燃料検査装置	燃料検査装置間 接冷却系			
	燃料検査装置 → 燃料検査装置上部位置 (燃料出入機)				
	燃料検査装置上部位置 (燃料出入機) → EVST 中継位置	燃料検査装置間 接冷却系			
	燃料検査装置上部位置 (燃料出入機)				
	EVST 中継位置 → EVST ラック	EVST 槽 内移送機、 回転ラック	燃料検査装置間 接冷却系	Na 冷却	
	EVST ラック → EVST 中継位置				
	EVST 中継位置 → EVST 上部位置 (燃料出入機)	燃料出入機	燃料出入機直接 冷却系 + 床側 Na 回収系	無冷却 (直接冷 却)	
EVST 上部位置 (燃料出入機) → キヤスク取扱装置上部位置 (燃料出入機)					
キヤスク取扱装置上部位置 (燃料出入機) → キヤスク取扱装置	吊り上げ し	燃料出入機	燃料出入機冷却系		
EVST 中継位置 → EVST 上部位置 (燃料出入機)	吊り上げ	燃料出入機	燃料出入機冷却系 + 床側 Na 回収系	無冷却 (直接冷 却)	
EVST 上部位置 (燃料出入機) → キヤスク取扱装置上部位置 (燃料出入機)	水平移送				
キヤスク取扱装置上部位置 (燃料出入機) → キヤスク取扱装置	吊り下ろ し	燃料出入機	燃料出入機冷却系		



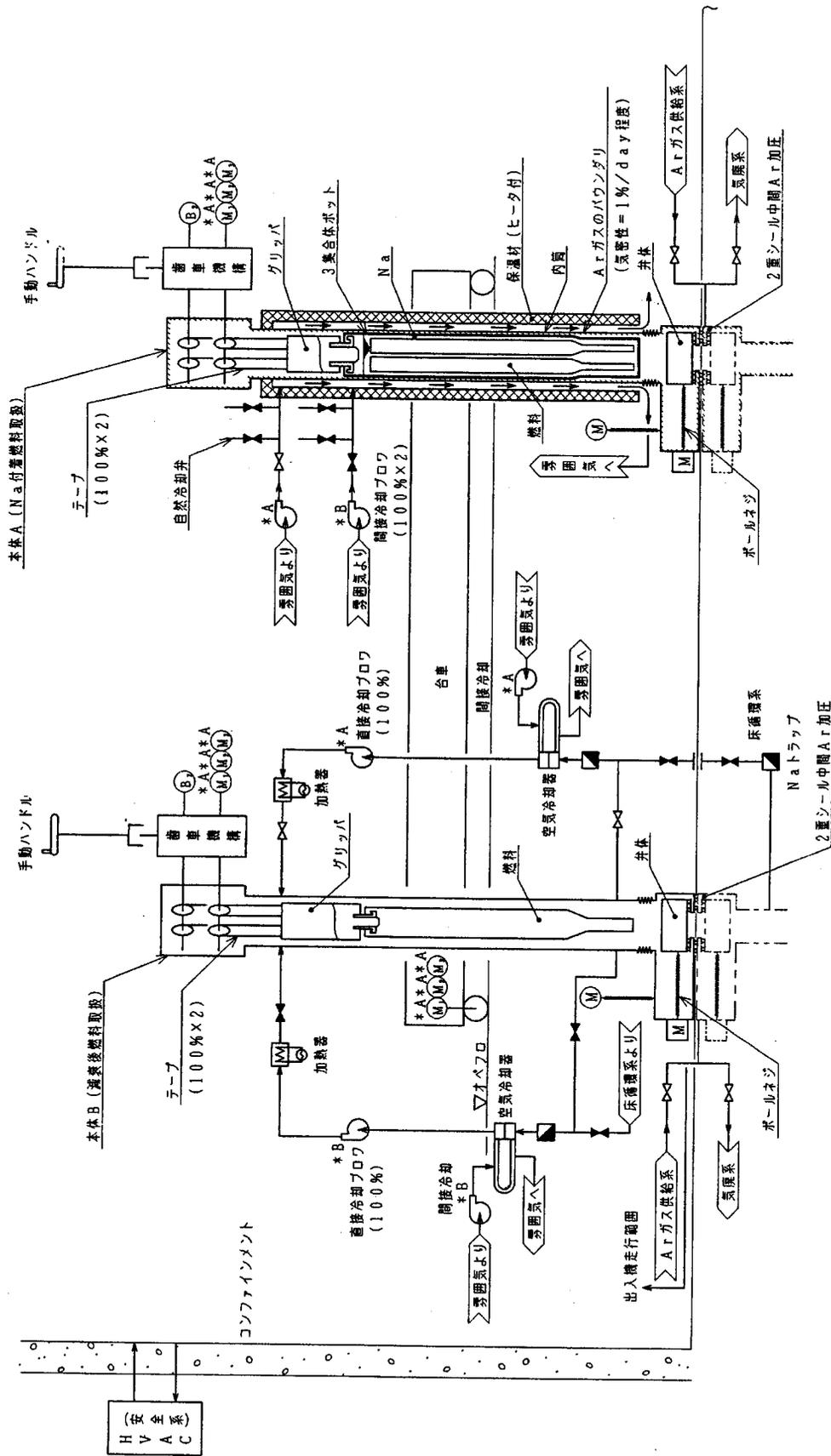


図 3.1.1-2 燃料出入機の冷却系統概念図 (EVST 方式)

(M): モータ  
 (B): フレキシ (無励磁式)

\* A, \* B  
 : 非常用電源 A 系, B 系  
 (暫定)

—: 冷却材保持パワンダリ  
 ---: P (ガス) パワンダリ

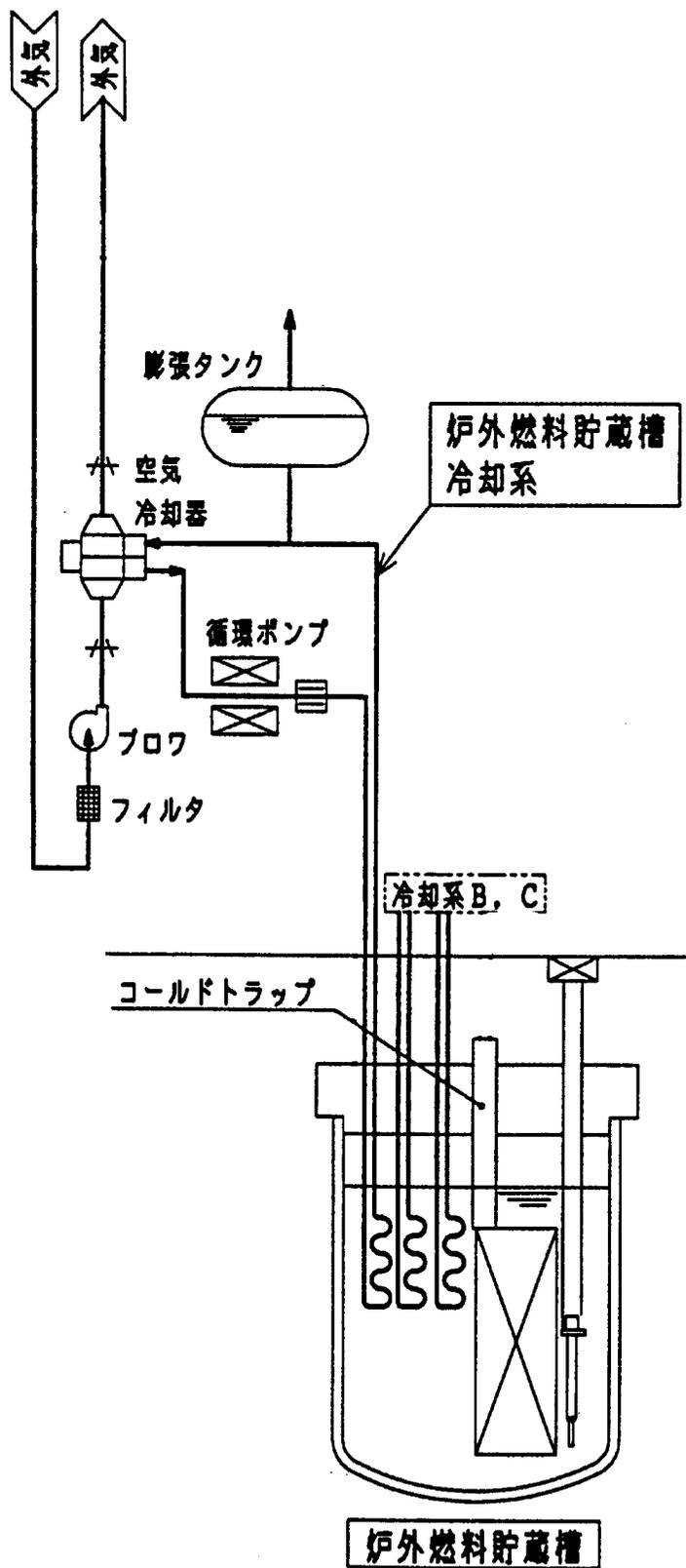


図 3. 1. 1-3 炉外燃料貯蔵槽の冷却系系統概念図 (EVST 方式)



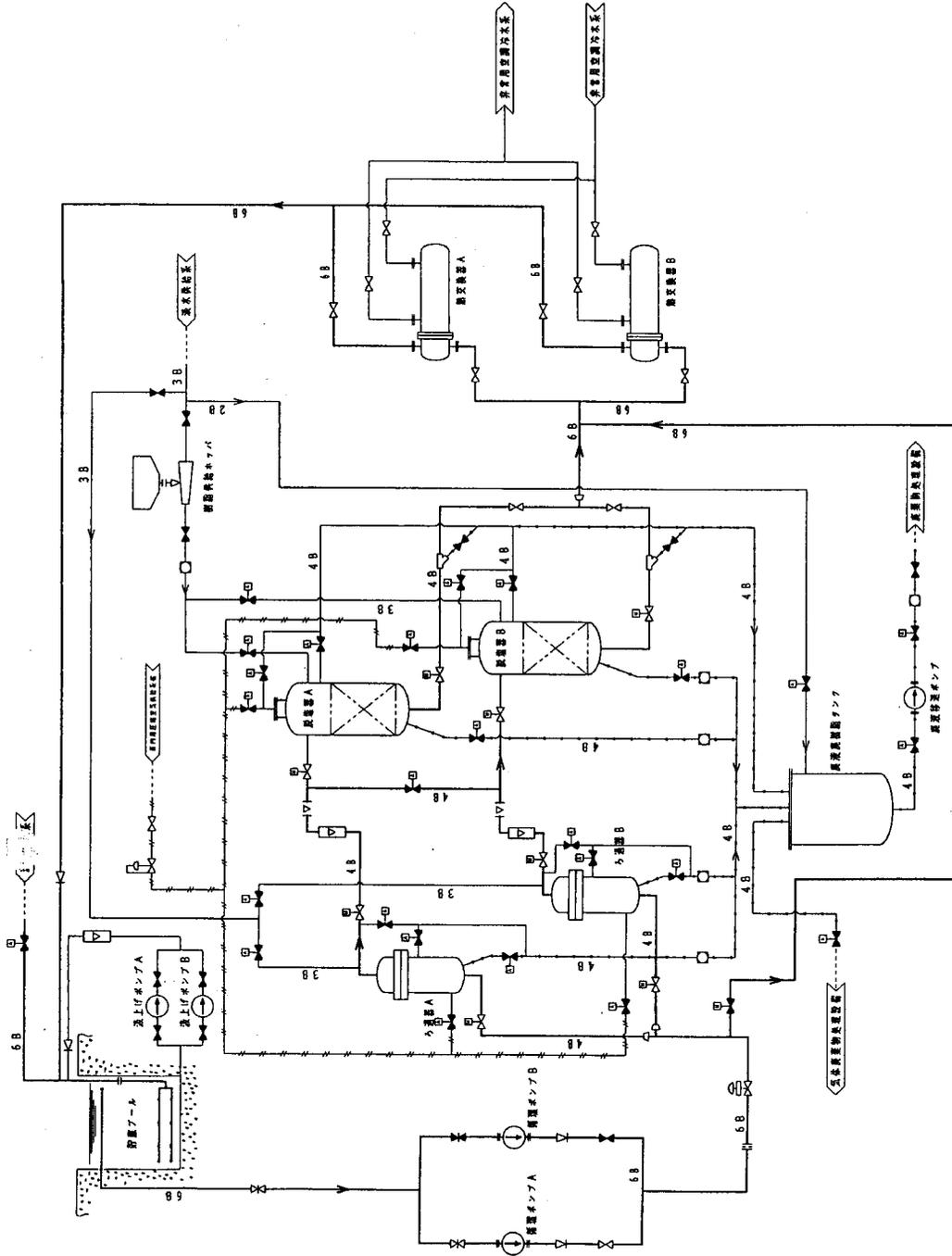
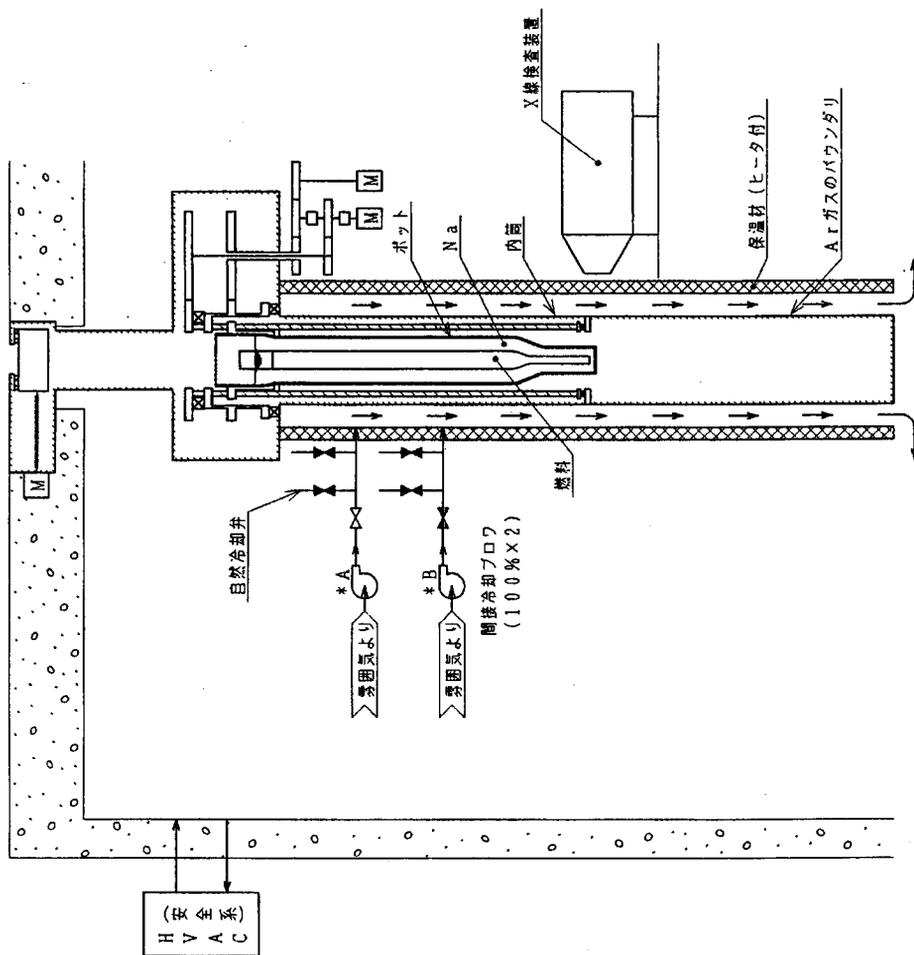


図 3.1.1-5 水プールの冷却浄化系統概念図 (EVST方式)



(M): モータ  
 (B): プレーキ (無励磁式)  
 \*A, \*B : 非常用電源 A系, B系 (暫定)

—: 冷却材保持バウンダリ  
 ...: F.P (ガス) バウンダリ

図 3.1.1-6 破損燃料検査装置の冷却系統概念図

### 3.1.2 水プール直接貯蔵方式の除熱方法

水プール直接貯蔵方式の場合の燃料取扱時の除熱方法を整理した。整理結果を表 3.1.2-1 に示す。複数集合体ポット中の未減衰燃料の移送に関しては EVST 方式と同等であり、新しい概念を採用している複数集合体ポット移送時の除熱性については確認が必要である

未減衰裸燃料を取扱う回転移送機、燃料昇降装置では直接冷却が常に必要で、かつ、短時間の冷却能力喪失でも過熱に至ると予想される。このため直接冷却系は 3 系統とし非常用電源及び無停電電源に接続する対応としている。同時に燃料出入機で吊り上げ、吊り下げする際にも床側の設備との間に循環系を確保し、常に直接冷却ガスを確保しつつ移送する。その場合でも、燃料エントランスノズルがナトリウム中または水中にある状態で停止した場合などでは冷却することができず、除熱上の課題となる。

破損燃料の場合には表 3.2-2 に示すとおり、EVST 貯蔵方式と同等である。よって、複数集合体ポットに 1 体の燃料を入れた体系での除熱性が課題となる。

水プール直接貯蔵方式の場合の燃料取扱系設備のうち冷却機能を有する機器についての冷却系の系統図を以下のとおり示す。

#### ① 炉内中継装置

非常用電源に接続した 2 系統のプロワによる間接冷却系で構成される。

#### ② 燃料出入機

複数集合体ポット移送本体は非常用電源に接続した 2 系統の間接冷却系による間接冷却系により構成される (図 3.1.2-1)。

#### ③ ナトリウム予熱槽

予熱槽は破損燃料のない場合は熱源がなく、通常時は自然放冷により除熱 (予熱) する。通常燃料の通過時及び破損燃料を貯蔵中は純化系の冷却系等を使って直接冷却される。

#### ④ 回転移送機

短時間の電源喪失と事故時の除熱確保の観点から冷却系は無停電電源及び非常用電源に接続した 3 系統の直接冷却系 (アルゴンガス循環系) とその直接冷却系を冷却する無停電電源及び非常用電源に接続した 3 系統の間接冷却系により構成される。回転移送機は同時に 2 基の本体で上記移送を行うことから、上記系統は各本体ごとに必要となるため、全部で 6 系統の冷却系を有することとなる (図 3.1.2-2)。

⑤ 燃料昇降装置

短時間の電源喪失と事故時の除熱確保の観点から冷却系は無停電電源及び非常用電源に接続した 3 系統の直接冷却系（アルゴンガス循環系）とその直接冷却系を冷却する無停電電源及び非常用電源に接続した 3 系統の間接冷却系により構成される。なお、燃料昇降装置についても 2 基設置されており、上記系統は同時に使用することからそれぞれ冷却系を有している（図 3.1.2-3）。

⑥ 水プール

2 基の循環ポンプと 2 基の熱交換器を有する 1 系統の冷却系により構成される。除熱容量は 4MW と EVST 貯蔵方式より増加するが系統構成は同等となる。

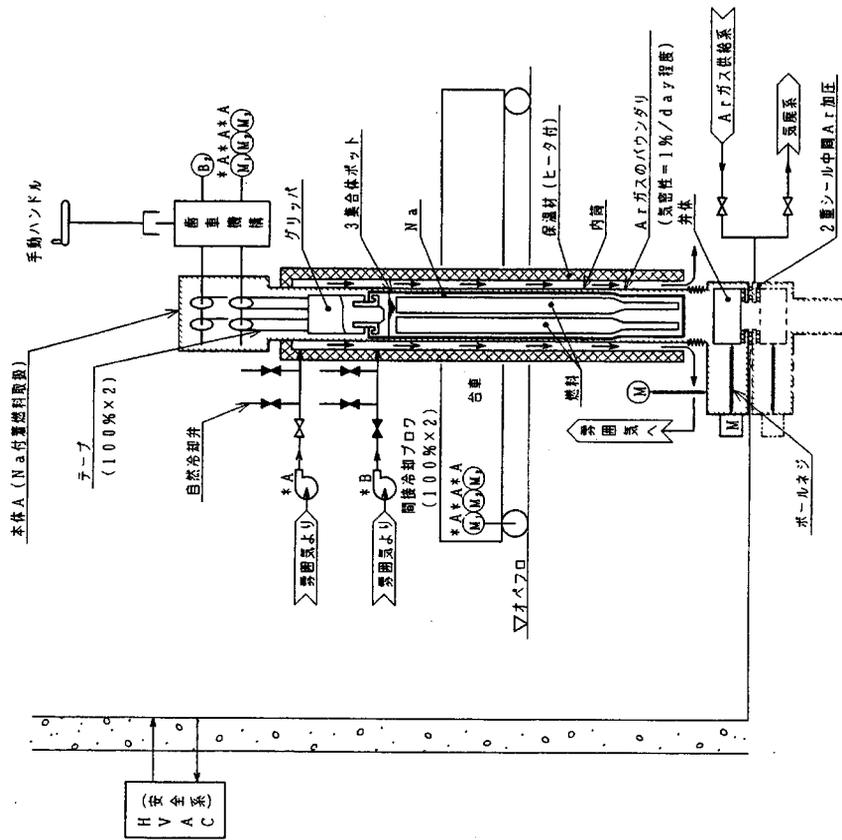
⑦ 破損燃料検査装置

非常用電源に接続した 2 系統の間接冷却系による間接冷却系により構成される。冷却系の系統構成は EVST 方式と同等となる。

表 3.1.2-1 使用済燃料の除熱方法 (水プール直接貯蔵方式)

移送範囲	移送動作	移送設備	冷却設備	冷却体系	備考
炉内中継位置 (炉内中継装置) → 炉上部位位置 (燃料出入機)	吊り上げ	燃料出入機	炉内中継装置間接冷却系	無冷却	移送停止時のみ間接冷却。断熱温度上昇でも移送時間 20 分程度のため、問題ない。事故時の除熱性は別途評価必要。
炉上部位位置 (燃料出入機) → 予熱槽上部位置 (燃料出入機)	水平移送		燃料出入機間接冷却系		
予熱槽上部位置 (燃料出入機) → 予熱槽中継位置	吊り下ろし		予熱槽案内筒間接冷却系		
予熱槽中継位置 → 予熱槽取り出し位置	回転	予熱槽回転ラック	予熱槽冷却系	Na 冷却	予熱槽内移送のため、冷却性に課題はない。
予熱槽取り出し位置 → 予熱槽上部洗浄位置	吊り上げ、静止	回転移送機	回転移送機直接冷却系 + 床側 Na 回収系	直接冷却	回転移送機直接冷却系と床側ナトリウム回収系を接続し、昇降時も直接冷却系の循環冷却ガスを確保。
予熱槽上部洗浄位置 → 予熱槽上部位置 (回転移送機)	吊り上げ				同上。洗浄位置で中温ガス洗浄後、吊り上げ。回転移送機の循環系の弁を開放してから床側ナトリウム回収系を隔離。
予熱槽上部位置 (回転移送機) → 燃料昇降装置上部位置 (回転移送機)	回転移送		回転移送機直接冷却系		回転移送機直接冷却系により直接冷却。
燃料昇降装置上部位置 (回転移送機) → 燃料昇降装置	吊り下ろし		回転移送機直接冷却系 + 床側循環系		回転移送機直接冷却系と床側循環系を接続し、昇降時も循環冷却ガスを確保。
燃料昇降装置 → 水プール (水中台車)	吊り下ろし	燃料昇降装置	燃料昇降装置直接冷却系		燃料昇降装置冷却系を起動後、回転移送機直接冷却系を切り離し。注水系により水浸漬
			— (水プール) 冷却系	水冷却	水中を水中台車まで下降





Ⓜ: モーター  
 ⓑ: プレーキ (無励磁式)

\*A, \*B  
 : 非常用電源A系, B系  
 (暫定)

—: 冷却材保持バウンダリ  
 ---: F P (ガス) バウンダリ

図 3. 1. 2-1 燃料出入機の冷却系統概念図 (水プール直接貯蔵方式)





## 3.2 代表事故事象の整理

### 3.2.1 整理方法

起因事象の摘出及び事象分類方法は、簡易的な発生頻度評価手法により行った。各系統の非信頼度をパッシブ安全系、パッシブ通常系、アクティブ安全系、アクティブ通常系の4つに分類して与え、多重性や使命時間の考慮などにより補正して求め、考慮不要なレベル ( $10^{-10}$ /炉年以下) との比較で対応の必要性を整理する方法である。事象分類については暫定的に本手法に基づく初期事象については以下のように暫定した。

- ・事象Ⅱ：発生頻度 $\geq 10^{-2}$ /炉年
- ・事象Ⅲ： $10^{-2}$ /炉年 $>$ 発生頻度 $\geq 10^{-4}$ /炉年
- ・事象Ⅳ： $10^{-4}$ /炉年 $>$ 発生頻度 $\geq 10^{-6}$ /炉年
- ・BDBE： $10^{-6}$ /炉年 $>$ 発生頻度 $> 10^{-10}$ /炉年

なお、 $10^{-10}$ /炉年より発生頻度が低い事象については想定外とした。

代表事象の整理にあたっては、以下の方針で行った。

- ① 事象推移が同等な事象の中では影響の最も厳しいと思われる事象を選定
- ② 影響が同程度の事象では、発生頻度の高い事象を選定
- ③ 発生頻度の高い事象において影響が同程度の事象が選定されている場合にはその事象で包絡

また、起動失敗により除熱性に課題の生じる事象（切替弁の開失敗）を除く事象は全て継続失敗の事象であり、事象の継続時間を考慮して起因事象に対して燃料交換時には  $10^{-2}$ 、減衰後の燃料の EVST から水プールへの取り出し時には  $10^{-1}$  のファクターを考慮し発生頻度を低減した。また、特定の位置で停止した場合さらに厳しい条件が予想される場合（EVST 上部ドアバルブ位置での昇降駆動系の固着等）には燃料交換時間に対する占有時間を考慮してより短い使命時間を考慮した。破損燃料の取扱時は発生頻度から言えばさらに低くなることも予想されるが、安全上は要求条件は同等と考えられるため通常の使用済燃料と同等の使命時間とした。

### 3.2.2 EVST 方式の代表事故事象

EVST 方式の場合の代表事故事象を評価して除熱評価の対象とすべき事象を抽出した。EVST方式の起回事象と発生頻度を表 3.2.2-1～6 にまとめる。これらの評価結果に基づき、代表事象を選定した結果を表 3.2.2-7 に示す。

燃料出入機については、未減衰の使用済燃料はナトリウムポットに収納されて移送されるため通常運転時は無冷却である。このため最も厳しい事故の起回事象としては駆動系のトリップおよび固着が挙げられる。減衰後の使用済燃料は裸で強制冷却が行われるため、冷却系の故障が厳しくなるが、水プール直接貯蔵方式における未減衰使用済燃料取扱いと比較して、冷却喪失時の時間余裕は大きいと考えられる。

EVST については、貯蔵設備であるため、冷却系の故障が事故起回事象となると考えられるが、冷却が喪失した場合でも集合体はナトリウム中に存在するため、移送系における事故と比較して事象推移は緩慢であると考えられる。

燃料検査設備については、未減衰時の使用済燃料をナトリウムポットに収納した状態で間接冷却を行っているため、冷却系の故障が事故起回事象となる。ただし、燃料検査設備の冷却系が故障した場合でも燃料出入機の冷却系を使用することが可能であると考えられ対応が可能である。

燃料昇降装置については、減衰後の使用済燃料を裸で強制冷却しつつ移送するため、冷却系の故障が厳しくなる。ただし、減衰後の使用済燃料であるため、水プール直接貯蔵方式における未減衰使用済燃料取扱いと比較して、冷却喪失時の時間余裕は大きいと考えられる。

代表事象を整理した結果、貯蔵設備は移送系設備と比較して事象推移が緩慢であり、検査設備は燃料検査設備と燃料出入機の冷却系の両方で冷却可能であるため、移送系設備における事故が除熱性がもっとも厳しくなることが明らかになった。

除熱評価対象として、移送設備に注目して外部電源喪失と単一故障の重ね合わせを考慮した条件で、設備対応と課題を整理し、除熱評価対象を抽出した。その結果を表 3.2.2-8 に示す。

燃料出入機における未減衰使用済燃料の取扱時は、ナトリウム冷却大型炉では複数体移送ポットを採用しているためナトリウムポット一体あたりの発熱量が大きい。このため移送系が故障した場合はナトリウムポットを間接冷却するが、このときの除熱性を評価対象

として選定した。

また、BDDE ではあるがナトリウムポットがドアバルブ位置で停止した場合は、可動ブロックの駆動機構や遮へい体の配置上、ナトリウムポットの一部のみしか冷却できないため、このときの除熱性を評価対象とした。

燃料出入機により破損燃料を取扱う場合は、原子炉の早期運転再開のため 30～45kW の高発熱の未減衰使用済燃料を取扱う可能性があるため破損燃料取扱時の除熱性を別途評価することとした。

表 3.2.2-1 (1/2) 除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (燃料出入機 : EVST 方式、未減衰燃料取扱時) 単位 : 1 / 炉年

分類	事象名	設備分類	信頼度レベル	使用時間考慮	多重性考慮*1	事象発生頻度*2	事象分類	備考
未減衰燃料取扱時 (通常燃料)	外部電源喪失	7カテゴリ 通常系	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-3</sup>	III	①で代表
	昇降系駆動モータのトリップ①	7カテゴリ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-4</sup>	III	代表事象①
	走行駆動系モータのトリップ	7カテゴリ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-4</sup>	III	①で代表
	昇降駆動系の固着②	7カテゴリ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-6</sup>	IV	代表事象②(①と比較して事象が同等だが低頻度)
	走行駆動系の固着	7カテゴリ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-6</sup>	IV	②で代表
	EVST 上部ドアバルブ位置での昇降駆動系の固着	7カテゴリ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-8</sup>	BDBE	④で代表
	EVST ガス中位置での昇降駆動系の固着	7カテゴリ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-8</sup>	BDBE	③で代表
	炉内ガス中位置での昇降駆動系の固着③	7カテゴリ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-8</sup>	BDBE	代表事象③ (6m/min での昇降時間効果を考慮)
	炉上部ドアバルブ位置での昇降駆動系の固着④	7カテゴリ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-8</sup>	BDBE	代表事象④ (6m/min での昇降時間効果を考慮)
	Na ポット破損による Na 漏洩	パッキング 安全系	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-10</sup>	想定外	(想定不要) 使用前検査、運用時の漏洩検知、落下試験及び落下時の緩衝装置対応前提で信頼度容器並みとし想定外とする

\*1 : 起因事象の発生機器が多重化されている場合の共通原因故障を考慮したファクタ (以下初期事象と発生頻度に係わる全ての表で同様)

\*2 : 事象発生頻度 = 信頼度レベル × 使用時間考慮 (ファクタ) × 多重性考慮 (ファクタ)

(以下初期事象と発生頻度に係わる全ての表で同様)

表 3.2.2-1 (2/2) 除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (燃料出入機 : EVST 方式、未減衰燃料取扱時) 単位 : 1 / 炉年

分類	事象名	設備分類	信頼度レベル	使用時間考慮	多重性考慮*	事象発生頻度*	事象分類	備考
未減衰燃料取扱時 (破損燃料)	外部電源喪失	7/7 17 通常系	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-3</sup>	III	①で代表
	昇降系駆動モータのトリップ①	7/7 17 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-4</sup>	III	代表事象①
	走行駆動系モータのトリップ	7/7 17 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-4</sup>	III	①で代表
	冷却系ブロワのトリップ	7/7 17 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-4</sup>	III	①で代表 (燃料検査設備に移送できれば過熱に至らない)
	空調系機能喪失	7/7 17 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-3</sup>	III	①で代表
	昇降駆動系の固着②	7/7 17 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-4</sup>	IV	代表事象② (①と比較して事象が同等だが低頻度)
	走行駆動系の固着	7/7 17 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-6</sup>	IV	②で代表
	冷却ブロワ固着	7/7 17 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-6</sup>	IV	②で代表
	冷却系配管の破損	7/7 17 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-6</sup>	IV	②で代表
	EVST 上部ドアハルブ位置での昇降駆動系の固着	7/7 17 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-8</sup>	BDBE	④で代表
	EVST ガス中位置での昇降駆動系の固着	7/7 17 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-8</sup>	BDBE	③で代表
	炉内ガス中位置での昇降駆動系の固着③	7/7 17 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-8</sup>	BDBE	代表事象③ (6m/min での昇降時間効果を考慮)
	炉上部ドアハルブ位置での昇降駆動系の固着④	7/7 17 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-8</sup>	BDBE	代表事象④ (6m/min での昇降時間効果を考慮)
	Na ポット破損による Na 漏洩	パッキン 安全系	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-10</sup>	想定外	(想定不要) 使用前検査、運用時の漏洩検知、落下試験及び落下時の緩衝装置対応前提で信頼度容器並みとして想定外とする

単位：1 / 炉年

表 3.2.2-2 除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (燃料出入機：EVST方式、減衰後燃料取扱時)

分類	事象名	設備分類	信頼度レベル	使用時間考慮	多重性考慮 <sup>1)</sup>	事象発生頻度 <sup>2)</sup>	事象分類	備考
減衰後燃料取扱時	外部電源喪失⑤	7クティブ 通常系	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-1</sup>	-	10 <sup>-2</sup>	II	代表事象⑥
	循環ブロワのトリップ	7クティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	-	10 <sup>-3</sup>	III	⑦で代表
	空調系機能喪失⑥	7クティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	-	10 <sup>-3</sup>	III	代表事象⑥
	昇降駆動系モータのトリップ	7クティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	-	10 <sup>-3</sup>	III	(より厳しい⑦で代表)
	空気ブロワのトリップ	7クティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	-	10 <sup>-3</sup>	III	(より厳しい⑦で代表)
	床側設備からの冷却系切替弁の開失	7クティブ 安全系	10 <sup>-3</sup>	-	-	10 <sup>-3</sup>	III	⑦で代表 (冷却系切替弁開を出入機の燃料洗浄のための吊上げ条件とする電氣的インターロック考慮)
	床側設備への冷却ガス系切替弁の開失	7クティブ 安全系	10 <sup>-3</sup>	-	-	10 <sup>-3</sup>	III	⑦で代表 (床側切替弁開を出入機の燃料下降の条件とする電氣的インターロック考慮)
	入口/出口弁の誤閉⑦	7クティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	-	10 <sup>-3</sup>	III	代表事象⑦
	加熱器の誤作動 (または洗浄後の停止失敗)	7クティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	-	10 <sup>-3</sup>	III	⑦で代表
	冷却系切り替え弁系の誤閉	7クティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	-	10 <sup>-3</sup>	III	⑦で代表
	Arガス冷却配管の破損⑧	パツジ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	-	10 <sup>-5</sup>	IV	代表事象⑧
	空気冷却器伝熱管の破損	パツジ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	-	10 <sup>-5</sup>	IV	⑧で代表
	ミストラップの目詰まり	パツジ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	-	10 <sup>-5</sup>	IV	⑧で代表
	循環ブロワの固着	7クティブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	-	10 <sup>-5</sup>	IV	⑧で代表
	空気冷却配管の破損	パツジ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	-	10 <sup>-5</sup>	IV	⑧で代表
	空気ブロワの固着	7クティブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	-	10 <sup>-5</sup>	IV	⑧で代表
昇降駆動系の固着	7クティブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	-	10 <sup>-5</sup>	IV	⑧で代表	
燃料のエントランスノズル Na 中停止 (昇降駆動系モータトリップ)⑨	7クティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-6</sup>	IV	代表事象⑨ (6m/min での昇降時間効果を考慮)	
燃料のエントランスノズル Na 中停止 (昇降駆動系の固着)	7クティブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-8</sup>	BDBE	⑨で代表 (低頻度)	

単位：1 / 炉年

表 3.2.2-3 除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (EVST: EVST方式)

事象名	設備分類	信頼度レベル	使命時 間考慮	多重性 考慮 <sup>*1</sup>	事象発生 頻度 <sup>*2</sup>	事象 分類	備考
外部電源喪失	77777 通常系	10 <sup>-1</sup>	-	-	10 <sup>-1</sup>	II	①で代表
Na 循環ポンプのトリップ①	77777 安全系	10 <sup>-3</sup>	-	-	10 <sup>-2</sup>	II	代表事象①
空気冷却器ベーンの開閉	77777 安全系	10 <sup>-2</sup>	-	-	10 <sup>-2</sup>	II	①で代表
空気ファンへのトリップ	77777 安全系	10 <sup>-2</sup>	-	-	10 <sup>-2</sup>	II	①で代表
空気冷却器ベーンの開閉による過冷却②	77777 安全系	10 <sup>-2</sup>	-	-	10 <sup>-2</sup>	II	代表事象②
Na 循環ポンプの流量増大による過冷却	77777 安全系	10 <sup>-2</sup>	-	-	10 <sup>-2</sup>	II	②で代表
ヒータの開閉による過冷却	77777 安全系	10 <sup>-2</sup>	-	-	10 <sup>-2</sup>	II	②で代表
ドレン弁の開閉	77777 安全系	10 <sup>-2</sup>	-	-	10 <sup>-2</sup>	II	②で代表
Na 冷却系配管の破損③	77777 安全系	10 <sup>-4</sup>	-	-	10 <sup>-4</sup>	III	代表事象③
空気ダクト、スタックの閉塞	77777 安全系	10 <sup>-4</sup>	-	-	10 <sup>-4</sup>	III	③で代表
空気ダクトの破損	77777 安全系	10 <sup>-4</sup>	-	-	10 <sup>-4</sup>	III	③で代表
外気取り込みフィルタの目詰まり	77777 安全系	10 <sup>-4</sup>	-	-	10 <sup>-4</sup>	III	③で代表
空気冷却器伝熱管の破損	77777 安全系	10 <sup>-4</sup>	-	-	10 <sup>-4</sup>	III	③で代表
空気ファンの固着	77777 安全系	10 <sup>-4</sup>	-	-	10 <sup>-4</sup>	III	③で代表
2 次 Na 火災	77777 安全系	10 <sup>-4</sup>	-	-	10 <sup>-4</sup>	III	③で代表
EVST 貯蔵容器からの Na 漏洩	77777 安全系	10 <sup>-8</sup>	-	-	10 <sup>-8</sup>	BDDBE	(想定不要) 確率上は BDDBE であるが、 外容器間の不活性化等の対策により 外容器との 2 重漏洩が起きない限り 問題なく、実質的に想定外とできる (想定不要)
EVST 貯蔵容器、外容器の二重漏洩	77777 安全系	<10 <sup>-10</sup>	-	-	<10 <sup>-10</sup>	想定外	(想定不要)

注：減衰後燃料の移送時の EVST 床側循環系の弁切替故障については燃料出入機にて考慮する。

単位：1/炉年

表 3.2.2-4 除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (燃料昇降装置：EVST方式)

事象名	設備分類	信頼度レベル	使用時間考慮	多重性考慮 <sup>*1</sup>	事象発生頻度 <sup>*2</sup>	事象分類	備考
外部電源喪失①	77717 通常系	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-1</sup>	—	10 <sup>-2</sup>	II	代表事象①
入口/出口弁の誤閉②	77717 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	—	10 <sup>-3</sup>	III	代表事象②
ブロワのトリップ	77717 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	—	10 <sup>-3</sup>	III	②で代表
空気ブロワのトリップ	77717 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	—	10 <sup>-3</sup>	III	②で代表
空調系機能喪失③	77717 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	—	10 <sup>-3</sup>	III	代表事象③
昇降駆動系モータのトリップ	77717 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	—	10 <sup>-3</sup>	III	②で代表
加熱器の誤作動	77717 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	—	10 <sup>-3</sup>	III	②で代表
切り替え弁の誤閉	77717 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	—	10 <sup>-3</sup>	III	②で代表
空気冷却配管の破損	パツジ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	—	10 <sup>-5</sup>	IV	④で代表
AIガス冷却配管の破損④	パツジ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	—	10 <sup>-5</sup>	IV	代表事象④
空気冷却器伝熱管の破損	パツジ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	—	10 <sup>-5</sup>	IV	④で代表
ミストトラップの目詰まり	パツジ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	—	10 <sup>-5</sup>	IV	④で代表
循環ブロワの固着	77717 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	—	10 <sup>-5</sup>	IV	④で代表
空気ブロワの固着	77717 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	—	10 <sup>-5</sup>	IV	④で代表
昇降駆動系の固着	77717 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup>	—	10 <sup>-5</sup>	IV	④で代表
燃料のエントランスノズル水中停止 (昇降駆動系モータトリップ) ⑤	77717 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	—	10 <sup>-5</sup>	IV	代表事象⑤ (0.6m/min の下降時間を考慮)
燃料のエントランスノズル水中停止 (昇降駆動系の固着)	77717 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	—	10 <sup>-7</sup>	BDBE	⑤で代表 (低頻度)

表 3.2.2-5 除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (破損燃料検査設備: EVST/水プール直接貯蔵方式共通) 単位: 1/炉年

事象名	設備分類	信頼度レベル	使用時間考慮	多重性考慮 <sup>*1</sup>	事象発生頻度 <sup>*2</sup>	事象分類	備考
外部電源喪失	7カテゴリ 通常系	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-3</sup>	III	②で代表
空調系機能喪失①	7カテゴリ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-4</sup>	III	代表事象①
冷却プロワトリップ	7カテゴリ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-4</sup>	III	②で代表
入口/出口弁の誤閉②	7カテゴリ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-4</sup>	III	代表事象②
冷却プロワ固着	7カテゴリ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-6</sup>	IV	②で代表
冷却系配管の破損③	パツジ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-6</sup>	IV	代表事象③
Na ポット破損による Na 漏洩	パツジ 安全系	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-10</sup>	想定外	(想定不要) 使用前検査、運用時の漏洩検知、落下試験及び落下時の緩衝装置対応前提で信頼度容器並みと想定外とする

単位：1 / 炉年

表 3.2.2-6 除熱性に係わる初期事象と発生頻度（使用済燃料プール：EVST方式）

事象名	設備分類	信頼度レベル	使命時 間考慮	多重性 考慮 <sup>*1</sup>	事象発生 頻度 <sup>*2</sup>	事象 分類	備考
入口/出口弁の誤閉①	パンプ/安全系	10 <sup>-2</sup>	—	—	10 <sup>-2</sup>	II	代表事象①
循環ポンプトリップ	パンプ/安全系	10 <sup>-2</sup>	—	—	10 <sup>-2</sup>	II	①で代表
冷却系配管の破損②	パンプ/安全系	10 <sup>-4</sup>	—	—	10 <sup>-4</sup>	III	代表事象②
循環ポンプ固着	パンプ/安全系	10 <sup>-4</sup>	—	—	10 <sup>-4</sup>	III	②で代表
脱塩器、ろ過器の目詰まり	パンプ/安全系	10 <sup>-4</sup>	—	—	10 <sup>-4</sup>	III	②で代表
熱交換器の破損	パンプ/安全系	10 <sup>-4</sup>	—	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-6</sup>	IV	②で代表（熱交換器50%×2基だが、1基でも制限温度以下に水温を維持可能）
水プールライナ漏洩	パンプ/安全系	<10 <sup>-10</sup>	—	—	<10 <sup>-10</sup>	想定 外	（想定不要）水プールライナ漏洩時にも外側にはコンクリートがあるため水喪失は短時間で発生することはなく、水プールライナからの水漏洩は考慮不要

注：使用済プールでは冷却系機能を喪失しても水蒸発までに十分な時間余裕があるため、過熱に至る可能性は少ないと考えられる

表 3. 2. 2-7 除熱性に係わる代表事象の整理結果 (EVST 方式)

設 備	事 象	II (発生頻度 $\geq 10^{-2}$ /炉年)	III ( $10^{-2}$ /炉年 $>$ 発生頻度 $\geq 10^{-4}$ /炉年)	IV ( $10^{-4}$ /炉年 $>$ 発生頻度 $\geq 10^{-6}$ /炉年)	BDBE ( $10^{-6}$ /炉年 $>$ 発生頻度 $\geq 10^{-10}$ /炉年)
燃料出入機	未減衰燃料取扱時、含む破損燃料取扱時	—	①昇降駆動系モータのトリップ	②昇降駆動系モータの固着	③炉内ガス中での昇降駆動系モータの固着 ④炉上部ドアバルブ位置での昇降駆動系モータの固着
	減衰後燃料取扱時、含む燃料洗浄設備	⑤外部電源喪失	⑥空調系機能喪失 ⑦入口/出口弁の誤閉	⑧Ar ガス冷却配管の破損 ⑨燃料のエントランスノズルNa 中停止 (昇降駆動系モータのトリップ)	—
EVST		①Na 循環ポンプのトリップ ②空気冷却器ベーンの開閉による過冷却	③Na 冷却配管の破損	—	—
燃料検査装置		—	①空調系機能喪失 ②入口/出口弁の誤閉	③冷却系配管破損	—
燃料昇降装置	①外部電源喪失	①空調系機能喪失 ②入口/出口弁の誤閉	④Ar ガス冷却配管の破損 ⑤燃料のエントランスノズル水中停止 (昇降駆動系モータのトリップ)	—	—
使用済燃料プール	①入口/出口弁の誤閉	②冷却系配管の破損	—	—	—

表 3. 2. 2-8 除熱評価対象の抽出結果 (EVST 方式)

事象区分	起因事象	単一故障	運転対応	備考		
			設備：冷却系 2 系統 + 移送機能			
燃料出入機 (未減衰燃料)	I	—	—	通常時は冷却無しで短時間で移送、移送系は A 系 D/G に接続	—	
	II	—	—	—	—	
	III	昇降駆動系モータトリップ + 外部電源喪失	非常用 D / GA 系起動失敗	炉内中継装置冷却 B 系で冷却	炉内中継装置冷却 A 系で冷却	・複数集合体ポット採用のため移送系故障時の間接冷却による除熱性の確認が必要 ・破損燃料取扱時には 30~45kW の高発熱集合体を移送
			非常用 D / GB 系起動失敗	炉内中継装置冷却 B 系で冷却		
	IV	昇降駆動系モータの固着 + 外部電源喪失	非常用 D / GA 系起動失敗 非常用 D / GB 系起動失敗	炉内中継装置冷却 B 系で冷却 炉内中継装置冷却 A 系で冷却	同上	同上
	B D B E	炉内ガス中での昇降駆動系モータの固着 + 外部電源喪失	—	—	炉内中継装置冷却系で冷却	下記の事象に包絡
			(起因事象 + 外部電源喪失の重ね合わせて $10^{-9}$ となるためこれ以上の重ね合わせ不要)	—	—	
	炉上部ドアバルブ位置での昇降駆動系モータの固着 + 外部電源喪失	— (同上)	—	炉内中継装置冷却系で冷却	ナトリウムポットの一部分のみ冷却可能なため、除熱性評価が必要	
出入機 (減衰後燃料)	I	—	—	通常時は 1 系統の直接冷却系 (A 系) で冷却しつつ移送。移送系は A 系 D/G に接続	減衰後燃料を取扱うため水プール直接貯蔵方式と比較して課題が少ない。	
	II	外部電源喪失	非常用 D / GA 系起動失敗	直接冷却 B 系で冷却	同上	
			非常用 D / GB 系起動失敗	直接冷却 A 系で冷却	同上	
	III	入口 / 出口弁の誤閉 (直接冷却系 A 系) + 外部電源喪失	非常用 D / GA 系起動失敗	直接冷却 B 系で冷却	移送機能に期待	同上
			非常用 D / GB 系起動失敗	移送機能に期待		
			待機冷却系の起動失敗	移送機能に期待	同上	
			非常用 D / GA 系起動失敗	直接冷却 B 系で冷却 (空調系機能喪失から室温上昇までの時間裕度大)		
		非常用 D / GB 系起動失敗	直接冷却 A 系で冷却 (空調系機能喪失から室温上昇までの時間裕度大)	同上		
	IV	Ar ガス冷却配管の破損 (直接冷却系 A 系) + 外部電源喪失	非常用 D / GA 系起動失敗	直接冷却 B 系で冷却	移送機能に期待	同上
			非常用 D / GB 系起動失敗	移送機能に期待		
待機冷却系の起動失敗			移送機能に期待	同上		
非常用 D / G 1 系起動失敗			強制冷却できないため、過熱までの時間余裕中の運転員の対応に期待する			
燃料昇降装置	I	—	—	通常時は 1 系統の直接冷却系 (A 系) で冷却しつつ移送。移送系は A 系 D/G に接続。	同上	
	II	外部電源喪失	非常用 D / GA 系起動失敗	直接冷却 B 系で冷却	同上	
			非常用 D / GB 系起動失敗	直接冷却 A 系で冷却	同上	
	III	入口 / 出口弁の誤閉 (直接冷却系 A 系) + 外部電源喪失	非常用 D / GA 系起動失敗	直接冷却 B 系で冷却	移送機能に期待	同上
			非常用 D / GB 系起動失敗	移送機能に期待		
			待機冷却系の起動失敗	移送機能に期待	同上	
			非常用 D / GA 系起動失敗	直接冷却 B 系で冷却 (空調系機能喪失から室温上昇までの時間裕度大)		
	非常用 D / GB 系起動失敗	直接冷却 A 系で冷却 (空調系機能喪失から室温上昇までの時間裕度大)	同上			
IV	Ar ガス冷却配管の破損 (直接冷却系 A 系) + 外部電源喪失	非常用 D / GA 系起動失敗	直接冷却 B 系で冷却	移送機能に期待	同上	
		非常用 D / GB 系起動失敗	移送機能に期待			
		待機冷却系の起動失敗	移送機能に期待	同上		
		非常用 D / G 1 系起動失敗	強制冷却できないため、過熱までの時間余裕中の運転員の対応に期待する			

### 3.2.3 水プール直接貯蔵方式の代表事故事象

水プール直接貯蔵方式の場合の代表事故事象を評価して除熱評価の対象とすべき事象を抽出した。水プール直接貯蔵方式の起因事象と発生頻度を表 3.2.3-1~5 にまとめる。これらの評価結果に基づき、代表事象を選定した結果を表 3.2.3-6 に示す。

燃料出入機については、未減衰使用済燃料をナトリウムポットに収納して移送するという点で EVST 方式と同等であり代表事象も同じである。

回転移送機については、未減衰の使用済燃料を直接強制冷却しつつ移送するため、冷却系の故障が厳しくなる。冷却系は独立 3 系統とし、無停電電源を設置して DBE で除熱喪失がないように対応している。ただし、使用済燃料のエントランスノズルがナトリウム中に浸漬した状態で停止した場合は直接冷却の除熱経路が確保不可能なため対策が必要である。

燃料昇降装置については、未減衰の使用済燃料を直接強制冷却しつつ移送するため、冷却系の故障が厳しくなる。冷却系は独立 3 系統とし、無停電電源を設置して DBE で除熱喪失がないように対応している。ただし、使用済燃料のエントランスノズルが水中に浸漬した状態で停止した場合は直接冷却の除熱経路が確保不可能なため対策が必要である。

予熱槽および水プールについては、貯蔵設備であるため事象が緩慢であり、移送系設備における事故が除熱性が比較的厳しくなると考えられる。

除熱評価対象として、移送設備に注目して外部電源喪失と単一故障の重ね合わせを考慮した条件で、設備対応と課題を整理し、除熱評価対象を抽出した。その結果を表 3.2.2-7 に示す。

燃料出入機における未減衰使用済燃料の取扱時は EVST と同じであるため、同様の事象を除熱評価対象とした。

回転移送機および燃料移送機については、未減衰使用済燃料を取扱うため、通常運転時の除熱性も課題となり評価対象とした。

未減衰燃料を裸直接冷却により取扱中に事故があった場合は、独立 3 系統の冷却系と無停電電源により DBE の範囲では燃料損傷に至らないための対策を行っているが、燃料集合体のエントランスノズルがナトリウムまたは水中に浸漬している場合は冷却経路が確保不可能のため、事故時に冷却が喪失した場合、燃料破損に至る時間を評価対象とした。

表 3.2.3-1 (1/2) 除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (燃料出入機：水プール直接貯蔵方式) 単位：1/2年

分類	事象名	設備分類	信頼度レベル	使用時間考慮	多重性考慮*1	事象発生頻度*2	事象分類	備考
未減衰燃料取扱時 (通常燃料)	外部電源喪失	アクティブ 通常系	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-3</sup>	III	①で代表
	昇降系駆動モータのトリップ①	アクティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-4</sup>	III	代表事象①
	走行駆動系モータのトリップ	アクティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-4</sup>	III	①で代表
	昇降駆動系の固着②	アクティブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-6</sup>	IV	代表事象②
	走行駆動系の固着	アクティブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-6</sup>	IV	②で代表
	予熱槽上部トアバルブ位置での昇降駆動系の固着	アクティブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-8</sup>	BDBE	④で代表 (6m/min での昇降時間効果を考慮)
	予熱槽ガス中位置での昇降駆動系の固着	アクティブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-8</sup>	BDBE	③で代表 (6m/min での昇降時間効果を考慮)
	炉内ガス中位置での昇降駆動系の固着③	アクティブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-8</sup>	BDBE	代表事象③ (6m/min での昇降時間効果を考慮)
	炉上部トアバルブ位置での昇降駆動系の固着④	アクティブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-8</sup>	BDBE	代表事象④ (6m/min での昇降時間効果を考慮)
	Na ボット破損による Na 漏洩	パッシブ 安全系	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-10</sup>	想定外	(想定不要) 使用前検査、運用時の漏洩検知、落下試験及び落下時の緩衝装置対応前提で信頼度容器並みとし想定外とする

\*1: 起因事象の発生機器が多重化されている場合に考慮するファクタ (以下初期事象と発生頻度に係わる全て表で同様)

\*2: 事象発生頻度 = 信頼度レベル × 使用時間考慮 (ファクタ) × 多重性考慮 (ファクタ)

(以下初期事象と発生頻度に係わる全て表で同様)

表 3.2.3-1 (2/2) 除熱性に係わる初期事象と発生頻度 (燃料出入機：水プール直接貯蔵方式) 単位：1/炉年

分類	事象名	設備分類	信頼度レベル	使用時間考慮	多重性考慮*	事象発生頻度*	事象分類	備考
未減衰燃料取扱時 (破損燃料)	外部電源喪失	アクティブ' 通常系	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-3</sup>	III	①で代表
	昇降系駆動モータのトリップ①	アクティブ' 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-4</sup>	III	代表事象①
	走行駆動系モータのトリップ	アクティブ' 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-4</sup>	III	①で代表
	冷却系ブロワのトリップ	アクティブ' 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-4</sup>	III	①で代表 (燃料検査設備に移送できれば過熱に至らない)
	空調系機能喪失	アクティブ' 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-3</sup>	III	①で代表
	昇降駆動系の固着②	アクティブ' 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-6</sup>	IV	代表事象②
	走行駆動系の固着	アクティブ' 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-6</sup>	IV	②で代表
	冷却ブロワ固着	アクティブ' 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-6</sup>	IV	②で代表
	冷却系配管の破損	アクティブ' 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-6</sup>	IV	②で代表
	予熱槽上部ドアバルブ位置での昇降駆動系の固着	アクティブ' 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-8</sup>	BDBE	④で代表 (6m/min での昇降時間効果を考慮)
	予熱槽ガス中位置での昇降駆動系の固着	アクティブ' 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-8</sup>	BDBE	③で代表 (6m/min での昇降時間効果を考慮)
	炉内ガス中位置での昇降駆動系の固着③	アクティブ' 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-8</sup>	BDBE	代表事象③ (6m/min での昇降時間効果を考慮)
	炉上部ドアバルブ位置での昇降駆動系の固着④	アクティブ' 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-8</sup>	BDBE	代表事象③ (6m/min での昇降時間効果を考慮)
	Na ボット破損による Na 漏洩	パッシブ' 安全系	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-2</sup>	-	10 <sup>-10</sup>	想定外	(想定不要) 使用前検査、運用時の漏洩検知、落下試験及び落下時の緩衝装置対応前提で信頼度容器並みとし想定外とする

単位：1/炉年

表 3.2.3-2 除熱性に係わる初期事象と発生頻度（回転移送機：水プール直接貯蔵方式）

事象名	設備分類	信頼度レベル	使用時間考慮	多重性考慮 <sup>1)</sup>	事象発生頻度 <sup>2)</sup>	事象分類	備考
外部電源喪失	アクティブ 通常系	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-3</sup>	III	②で代表
冷却系切替弁の開失敗	アクティブ 安全系	10 <sup>-3</sup>	—	—	10 <sup>-3</sup>	III	②で代表
床側設備切替弁の開失敗	アクティブ 安全系	10 <sup>-3</sup>	—	—	10 <sup>-3</sup>	III	②で代表
循環プロワのトリップ	アクティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-4</sup>	III	②で代表
空気プロワのトリップ	アクティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-4</sup>	III	②で代表
空調系機能喪失①	アクティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-4</sup>	III	代表事象①
昇降駆動系モータのトリップ	アクティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-4</sup>	III	②で代表
入口/出口弁の閉閉②	アクティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-4</sup>	III	代表事象②
加熱器の誤作動	アクティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-4</sup>	III	②で代表
冷却系切替弁の誤閉	アクティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-4</sup>	III	②で代表
空気冷却配管の破損	パッシブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-6</sup>	IV	③で代表
AR ガス冷却配管の破損③	パッシブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-6</sup>	IV	代表事象③
空気冷却器伝熱管の破損	パッシブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-6</sup>	IV	③で代表
ミストラップの目詰まり	パッシブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-6</sup>	IV	③で代表
空気プロワの固着	アクティブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-6</sup>	IV	③で代表
循環プロワの固着	アクティブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-6</sup>	IV	③で代表
昇降駆動系の固着	アクティブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-6</sup>	IV	③で代表
燃料のエントランスノズル Na 中停止（昇降駆動系モータトリップ）④	アクティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-4</sup>	—	10 <sup>-6</sup>	IV	代表事象④（6m/minの昇降時間を考慮）
燃料のエントランスノズル Na 中停止（昇降駆動系の固着）	アクティブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	—	10 <sup>-8</sup>	BDBE	④で代表（6m/minの昇降時間を考慮）

単位：1/炉年

表 3.2.3-3 除熱性に係わる初期事象と発生頻度（ナトリウム予熱槽：水プール直接貯蔵方式）

事象名	設備分類	信頼度レベル	使命時 間考慮	多重性 考慮 <sup>*1</sup>	事象発 生頻度 <sup>*2</sup>	事象 分類	備考
入口/出口弁の誤閉①	ポンプ/安全系	10 <sup>-2</sup>	-	-	10 <sup>-2</sup>	II	代表事象①
電磁ポンプトリップ	ポンプ/安全系	10 <sup>-2</sup>	-	-	10 <sup>-2</sup>	II	①で代表
冷却系配管の破損②	ポンプ/安全系	10 <sup>-4</sup>	-	-	10 <sup>-4</sup>	III	代表事象②
熱交換器の破損	ポンプ/安全系	10 <sup>-4</sup>	-	-	10 <sup>-4</sup>	III	②で代表
コールドトラップの目詰まり	ポンプ/安全系	10 <sup>-4</sup>	-	-	10 <sup>-4</sup>	III	②で代表
予熱槽 Na 漏洩	ポンプ/安全系	10 <sup>-8</sup>	-	-	10 <sup>-8</sup>	BDBE	(想定外) EVST 貯蔵容器と同様に確 率上は BDBE だが想定外として扱う

注 1：Na 予熱槽については冷却系基本構成が詳細未設定のため、投げ込み式純化系により除熱するものと暫定した。

注 2：燃料の移送時の予熱槽床側循環系の弁切替故障については燃料回転移送機にて考慮する。

単位：1/炉年

表 3.2.3-4 除熱性に係わる初期事象と発生頻度（燃料昇降装置：水プール直接貯蔵方式）

事象名	設備分類	信頼度 レベル	使命時 間考慮	多重性 考慮 <sup>*1</sup>	事象発 生頻度 <sup>*2</sup>	事象 分類	備考 / ( ) 内は事象選定の考え方
外部電源喪失	アクティブ 通常系	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-3</sup>	III	②で代表
空調系機能喪失①	アクティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-4</sup>	III	代表事象①
ブロワのトリップ	アクティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-4</sup>	III	②で代表
加熱器の誤作動	アクティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-4</sup>	III	②で代表
昇降駆動系モータのトリップ	アクティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-4</sup>	III	②で代表
冷却系切替弁の開失敗	アクティブ 安全系	10 <sup>-3</sup>	—	—	10 <sup>-3</sup>	III	②で代表
冷却系切替弁の誤閉	アクティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-4</sup>	III	②で代表
入口/出口弁の誤閉②	アクティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-4</sup>	III	代表事象②
空気がブロワのトリップ	アクティブ 安全系	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-4</sup>	III	②で代表
空気が冷却配管の破損	パッシブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-6</sup>	IV	③で代表
エアガス冷却配管の破損③	パッシブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-4</sup>	IV	代表事象③
空気が冷却器伝熱管の破損	パッシブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-6</sup>	IV	③で代表
ミストトラップの目詰まり	パッシブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-6</sup>	IV	③で代表
循環ブロワの固着	アクティブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-6</sup>	IV	③で代表
空気がブロワの固着	アクティブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-6</sup>	IV	③で代表
昇降駆動系の固着	アクティブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	—	10 <sup>-6</sup>	IV	③で代表
燃料のエントランスノズル水中停止 (給水系電磁弁の誤閉) ④	アクティブ 安全系	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	—	10 <sup>-6</sup>	IV	代表事象④ (注水速度 0.6m/min を考慮)
燃料のエントランスノズル水中停止 (給水配管の破損)	パッシブ 安全系	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	—	10 <sup>-7</sup>	BDBE	④で代表

単位：1/炉年

表 3.2.3-5 除熱性に係わる初期事象と発生頻度（使用済燃料プール：水プール直接貯蔵方式）

事象名	設備分類	信頼度レベル	使命時 間考慮	多重性 考慮 <sup>#1</sup>	事象発 生頻度 <sup>#2</sup>	事象 分類	備考
入口/出口弁の誤閉①	7カテゴリ安全系	10 <sup>-2</sup>	-	-	10 <sup>-2</sup>	II	代表事象①
循環ポンプトリップ	7カテゴリ安全系	10 <sup>-2</sup>	-	-	10 <sup>-2</sup>	II	①で代表
冷却系配管の破損②	8カテゴリ安全系	10 <sup>-4</sup>	-	-	10 <sup>-4</sup>	III	代表事象②
循環ポンプ固着	7カテゴリ安全系	10 <sup>-4</sup>	-	-	10 <sup>-4</sup>	III	②で代表
脱塩器、ろ過器の目詰まり	8カテゴリ安全系	10 <sup>-4</sup>	-	-	10 <sup>-4</sup>	III	②で代表
熱交換器の破損	8カテゴリ安全系	10 <sup>-4</sup>	-	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-6</sup>	IV	②で代表（熱交換器50%×2基だが、1基でも制限温度以下に水温を維持可能）
水プールライナ漏洩	8カテゴリ安全系	<10 <sup>-10</sup>	-	-	<10 <sup>-10</sup>	想定外	（想定不要）水プールライナ漏洩時にも外側にはコンクリートがあるため水喪失は短時間で発生することはなく、水プールライナからの水漏洩は考慮不要

注：使用済プールでは冷却系機能を喪失しても水蒸発まで十分に時間余裕があるため、過熱に至る可能性は少ないが、水プール直接貯蔵では高発熱状態で水中装荷されるため、その影響の確認が必要

表 3.2.3-6 除熱性に係わる代表事象の整理結果 (水プール直接貯蔵方式)

設 備	事 象	II (発生頻度 $\geq 10^{-2}$ /炉年)	III ( $10^{-2}$ /炉年 $>$ 発生頻度 $\geq 10^{-4}$ /炉年)	IV ( $10^{-4}$ /炉年 $>$ 発生頻度 $\geq 10^{-6}$ /炉年)	BDBE ( $10^{-6}$ /炉年 $>$ 発生頻度 $> 10^{-10}$ /炉年)
燃料出入機 (未減衰燃料、破損燃料取扱時)		—	①昇降駆動系モータのトリップ	②昇降駆動系モータの固着	③炉内ガス中での昇降駆動系モータの固着 ④炉上部ドアバルブ位置での昇降駆動系モータの固着
回転移送機		—	①空調系機能喪失 ②入口/出口弁の誤閉	④燃料のエントランスノズル Na 中停止 ③Ar ガス冷却配管の破損	—
燃料昇降装置		—	①空調系機能喪失 ②入口/出口弁の誤閉	③Ar 配管の破損 ④燃料のエントランスノズル水中停止 (給水系電磁弁の誤閉)	—
燃料検査装置		—	①空調系機能喪失 ②入口/出口弁の誤閉	③冷却系配管破損	—
Na 予熱槽		①入口/出口弁の誤閉	②冷却系配管の破損	—	—
使用済燃料プール		①入口/出口弁の誤閉	②冷却系配管の破損	—	—

注 1：使用済燃料プールについては、通常の貯蔵時においても高発熱燃料の表面の部分沸騰などが発生しないことを確認する必要がある

表 3.2.3-7 除熱評価対象の抽出結果（水プール直接貯蔵方式）

事象区分	起因事象	単一故障	運転対応	課題及び確認項目	
			設備：冷却系3系統 (出入機は2系統+移送機能) 通常時は冷却無しで短時間で移送		
燃料 出入 機	I	—	—	—	
	II	—	—	—	
	III	昇降駆動系モータトリップ	非常用D/GA系起動失敗	炉内中継装置冷却B系で冷却	EVSTと同等
			非常用D/GB系起動失敗	炉内中継装置冷却A系で冷却	
	IV	昇降駆動系モータの固着	非常用D/GA系起動失敗	炉内中継装置冷却B系で冷却	同上
			非常用D/GB系起動失敗	炉内中継装置冷却A系で冷却	
	B D B E	炉内ガス中での昇降駆動系モータの固着	— (起因事象+外部電源喪失の重ね合わせて $10^{-9}$ となるためこれ以上の重ね合わせ不要)	炉内中継装置冷却系で冷却	同上
炉上部ドアバルブ位置での昇降駆動系モータの固着			(同上)	炉内中継装置冷却系で冷却	
回 転 移 送 機	I	—	通常時は1系統の直接冷却系(A系)で冷却しつつ移送。移送系はA系D/Gに接続、直接冷却系C系はA系D/Gに接続	冷却系の多重化、無停電電源によりDBEでは冷却を維持	
	II	—	—	同上	
	III	床側設備への冷却ガス系切替弁の開失敗(直接冷却系A系)+外部電源喪失	非常用D/GA系起動失敗	直接冷却B系で冷却	同上
			非常用D/GB系起動失敗	直接冷却C系で冷却	
			待機冷却系の起動失敗	起動失敗していないもう1つの待機系で冷却	
		空調系機能喪失+外部電源喪失	非常用D/GA系起動失敗	直接冷却B系で冷却(空調系機能喪失から室温上昇までの時間裕度大)	同上
	非常用D/GB系起動失敗	直接冷却A系で冷却(空調系機能喪失から室温上昇までの時間裕度大)	同上		
	IV	Ar配管の破損(直接冷却系A系)+外部電源喪失	非常用D/GA系起動失敗	直接冷却B系で冷却	同上
			非常用D/GB系起動失敗	直接冷却C系で冷却	
			待機冷却系の起動失敗	起動失敗していないもう1つの待機系で冷却	
燃料のエントランスノズルNa中停止(昇降駆動系モータトリップ)+外部電源喪失	非常用D/G1系起動失敗	Na注入系によりNa浸漬することに期待する	冷却停止からNa注入までの時間裕度の評価必要		
燃 料 昇 降 装 置	I	—	通常時は1系統の直接冷却系(A系)で冷却しつつ移送。移送系はA系D/Gに接続、直接冷却系B系はB系D/Gに接続、直接冷却系C系はA系D/Gに接続	—	
	II	—	—	—	
	III	入口/出口弁の誤閉(直接冷却系A系)+外部電源喪失	非常用D/GA系起動失敗	直接冷却B系で冷却	—
			非常用D/GB系起動失敗	直接冷却C系で冷却	
			待機冷却系の起動失敗	起動失敗していないもう1つの待機系で冷却	
		空調系機能喪失+外部電源喪失	非常用D/GA系起動失敗	直接冷却B系で冷却(空調系機能喪失から室温上昇までの時間裕度大)	—
	非常用D/GB系起動失敗	直接冷却A系で冷却(空調系機能喪失から室温上昇までの時間裕度大)	—		
	IV	Ar配管の破損(直接冷却系A系)+外部電源喪失	非常用D/GA系起動失敗	直接冷却B系で冷却	—
			非常用D/GB系起動失敗	直接冷却C系で冷却	
			待機冷却系の起動失敗	起動失敗していないもう1つの待機系で冷却	
燃料のエントランスノズル水中停止(給水系電磁弁の誤閉)+外部電源喪失		非常用D/GA系起動失敗	非常用水注入系により水浸漬することに期待する	冷却停止からの水注入までの時間裕度の評価必要	
非常用D/GB系起動失敗	もう1つの電磁弁開により給水継続				

#### 4. 除熱評価

3.2 節で抽出した以下の事象について除熱評価を実施した。

- ・使用済燃料ナトリウムポット間接冷却
- ・使用済燃料ナトリウムポット間接冷却一部喪失
- ・使用済燃料直接冷却
- ・使用済燃料直接冷却除熱喪失
- ・破損燃料ナトリウムポット間接冷却

## 4.1 ナトリウムポット間接冷却

### (1) 概要

原子炉から EVST (EVST 方式) またはナトリウム予熱槽 (水プール直接貯蔵方式) に未減衰燃料を移送する際には未減衰燃料をナトリウムポットに収納して移送する。この間には取扱時間が短いため無冷却で移送を実施する設計となっている。ただし、燃料出入機等の移送系機器が故障した場合は、ナトリウムポットを間接冷却することにより除熱が確保される。ナトリウム冷却大型炉では燃料交換時間の合理化のため複数体の使用済燃料が 1 体のナトリウムポットに収納されるため、ナトリウムポットの間接冷却の可能性が課題となる。ここでは多次元熱流動解析コード ZEPHYRUS[2]によりナトリウムポットによる間接冷却時の被覆管最高温度を評価した。また、評価結果からナトリウムポットの外径および収納する集合体数をパラメータとした外挿評価を実施して、被覆管制限温度を満たすナトリウムポット仕様の範囲を検討した。

### (2) 検討条件

解析体系を図 4.1-1 に示す。1 体のナトリウムポットには各 3 体の燃料集合体を収納するようになっており、フィンなしとフィン付それぞれを解析対象とした。解析モデルとしては径方向の対象性を考慮して 1 集合体分である径方向 1/3 部分を二次元体系でモデル化した。熱の流れは、燃料集合体→ポット内ナトリウム→ポット→フィン (フィン付の場合) →アルゴンガス→コフィン内筒→冷却空気とし、冷却空気からコフィン外筒への熱移動は考慮しなかった。ナトリウムポット、燃料集合体、冷却系の基本仕様を以下に示す。

#### (ナトリウムポット)

	フィン付ポット	フィン無しポット
ナトリウムポット内径	670mm	690mm
ナトリウムポット外径	680mm	700mm
フィン長さ(高さ)	10mm	
フィン厚さ	3mm	
フィン枚数	120 枚	
フィン効率	0.94	
コフィン内筒内径	720mm	720mm
コフィン内筒外径	746mm	746mm
コフィン外筒内径	782mm	782mm

#### (燃料集合体)

燃料ピン径	8.5mm
燃料ピン配列ピッチ	10.03mm

燃料ピン本数	271 本
燃料部高さ	800mm
燃料発熱量	パラメータ (ナトリウム冷却大型炉では 18kW)
軸方向発熱分布	発熱分布チョップトコサイン (ピーキング係数 1.25)

(冷却系)

冷却空気入口温度	40℃
冷却空気流量	30Nm <sup>3</sup> /min、24Nm <sup>3</sup> /min (後者は影響評価用解析) なお、流量はポット径 700mm に対する値であり、 ポット径を変えた場合の外挿においてポット冷却流 量はポット径に比例した流量となる。
ポット外面放射率	0.4
コフィン内面放射率	0.4

また熱伝達の経路としては以下を想定した。

- ・ポット内のナトリウム自然対流循環における熱伝達
- ・ナトリウムの熱伝導
- ・ポット外表面とコフィン内筒の輻射
- ・ポット外表面とコフィン内筒との間の熱伝導
- ・構造材の熱伝導 (材質は SUS316 を暫定)
- ・コフィン内筒表面と冷却空気との熱伝達 (Colburn の式による)

### (3) 除熱解析

使用済燃料発熱量と被覆管最高温度の関係をフィン付ポットについて図 4.1-2 フィンなしポットについて図 4.1-3 に示す。結果の概要を以下に示す。

ポット	被覆管最高温度		
	450℃	550℃	600℃
フィン付 (φ700mm)	12kW/体	19kW/体	25kW/体
フィン無し (φ700mm)	8kW/体	13kW/体	16kW/体

ナトリウム冷却大型炉では使用済燃料 1 体当たりの発熱量は 18kW と想定されており、被覆管の温度制限は 5 章の被覆管制限温度の検討より、長期事象 (30 日) で 600℃、短期事象 (1 日) で 630℃と評価される。このため外径 700mm のナトリウムポットに 3 体収納する場合はナトリウムポットにフィンを付ける必要があることが明らかになった。

## (4) ポット仕様のサーベイ検討

上記のポット外径 700mm の場合の結果に基づき、ポット径および収納燃料集合体数をパラメータとして以下を仮定した被覆管最高温度の外挿評価を行った。

- ・ポット内の全崩壊熱量はポットからの放熱量と同じ
- ・収納する集合体数にかかわらずポット内の熱流動特性は同じ
- ・収納される集合体の総発熱量が同じな場合はポット径が同じであれば放熱量は同じ
- ・ポット外表面近傍の高さ方向の温度分布が同じであれば、ポットからの放熱量はその径に比例する
- ・収納される集合体の総発熱量が同じでポット径が同じであればポット高さ方向の温度分布は同じ
- ・ポット内総発熱量とポット径の比が同じであれば、ポット高さ方向温度分布はほぼ同じとし、被覆管最高温度もほぼ同じ

ポットの外径をパラメータとしたときの使用済燃料発熱量と被覆管最高温度の関係をフィン付ポットについて図 4.1-2 フィンなしポットについて図 4.1-3 に示す。ポット径が 100mm 増加すると被覆管最高温度は約 30℃ 低下する。使用済燃料の発熱量を 18kW とするとフィンなしポットの被覆管最高温度を 600℃ 以下にするためには、ポット径を 900mm 程度とする必要があり、物量への影響が大きくなることが明らかになった。

1 体のポットに 2 集合体を収納した場合（以下 2 集合体ポット）の使用済燃料発熱量と被覆管最高温度の関係をフィン付ポットについて図 4.1-4 フィンなしポットについて図 4.1-5 に示す。2 集合体ポットの結果の概要を以下に示す。

ポット	被覆管最高温度		
	450℃	550℃	600℃
フィン付 (φ500mm)	13kW/体	21kW/体	26kW/体
フィン無し (φ600mm)	10kW/体	17kW/体	21kW/体

1 体のポットに 1 集合体を収納した場合（以下 1 集合体ポット）の使用済燃料発熱量と被覆管最高温度の関係をフィン付ポットについて図 4.1-6 フィンなしポットについて図 4.1-7 に示す。1 集合体ポットの結果の概要を以下に示す。

ポット	被覆管最高温度		
	450℃	550℃	600℃
フィン付 (φ300mm)	16kW/体	25kW/体	32kW/体
フィン無し (φ300mm)	10kW/体	17kW/体	21kW/体

ポットに収納する集合体数を 2 体以下とした場合は、フィンなしポットにおいても被覆

管最高温度を 600℃以下に保つことが可能であることが明らかになった。

参考までに冷却空気流量を 24Nm<sup>3</sup>/min と 30Nm<sup>3</sup>/min と変化した場合の被覆管最高温度を図 4.1-8 に示す。冷却材空気流量が被覆管最高温度に与える影響は小さいことが明らかになった。

#### (5) まとめ

多次元熱流動解析の結果、3 集合体ポットの場合は除熱の観点からポット表面にフィンを設置した場合、ポット径 700mm で設計可能であることがわかった。ポット径をパラメータとした評価を実施したが、フィンなしで被覆管制限温度を満たすためにはポット径 900mm 以上が必要でありあることがわかった。ポット径の拡大は炉内中継槽径および原子炉容器径に影響があるため、3 集合体ポットではフィンを前提とした設計が必要であると考えられる。

外挿評価の結果、2 集合体ポットの場合はポット径はフィン付で 500mm、フィンなしで 600mm で制限条件を満たし、1 集合体ポットの場合はフィン付、フィンなしともに 300mm で制限条件を満たす可能性があることが明らかになった。

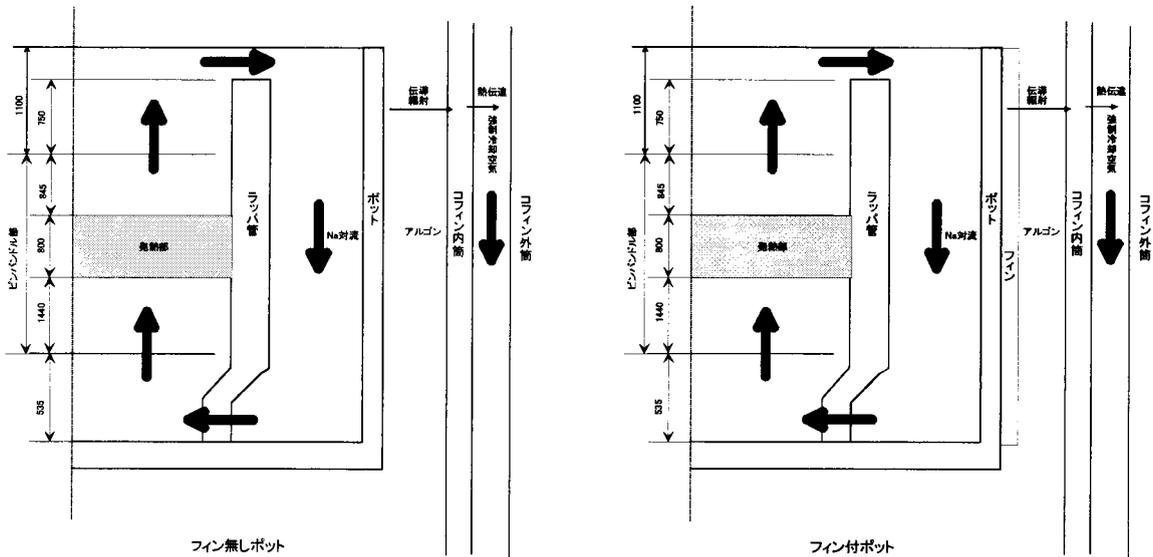
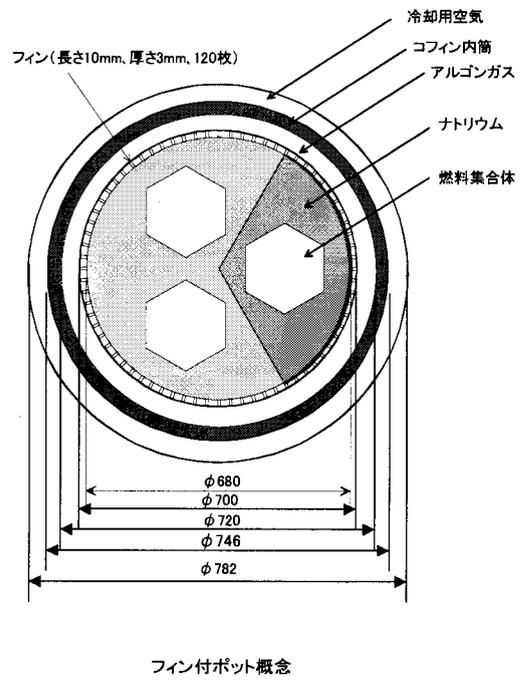
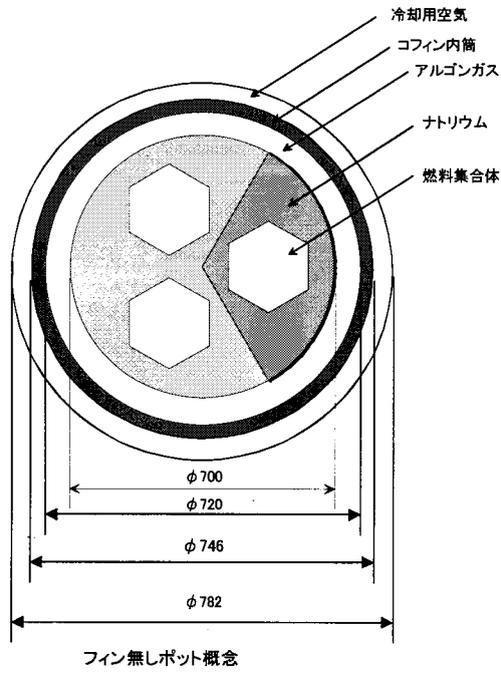


図 4.1-1 ナトリウムポット間接冷却の解析体系

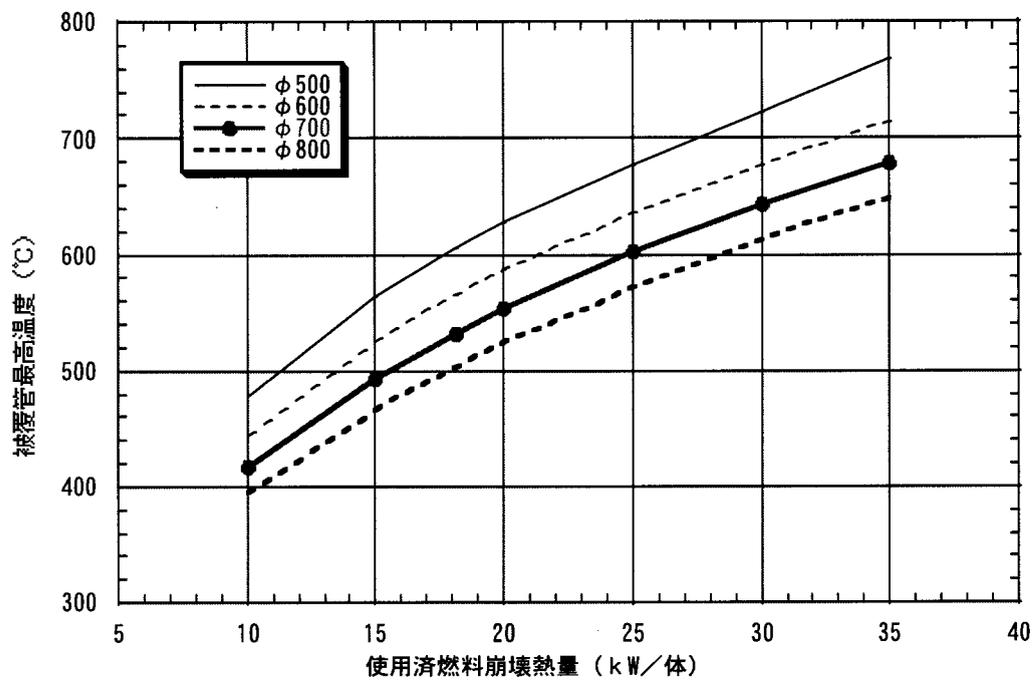


図 4.1-2 ナトリウムポット間接冷却時の発熱量と被覆管温度の関係  
(フィン付3集合体ポット)

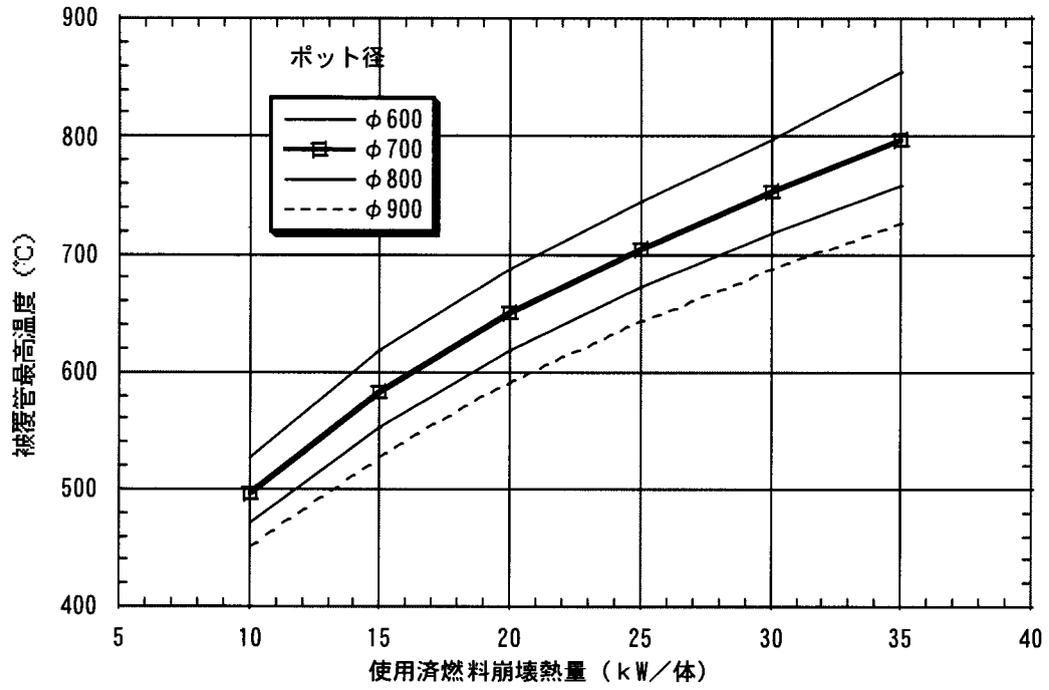


図 4.1-3 ナトリウムポット間接冷却時の発熱量と被覆管温度の関係  
(フィンなし 3 集合体ポット)

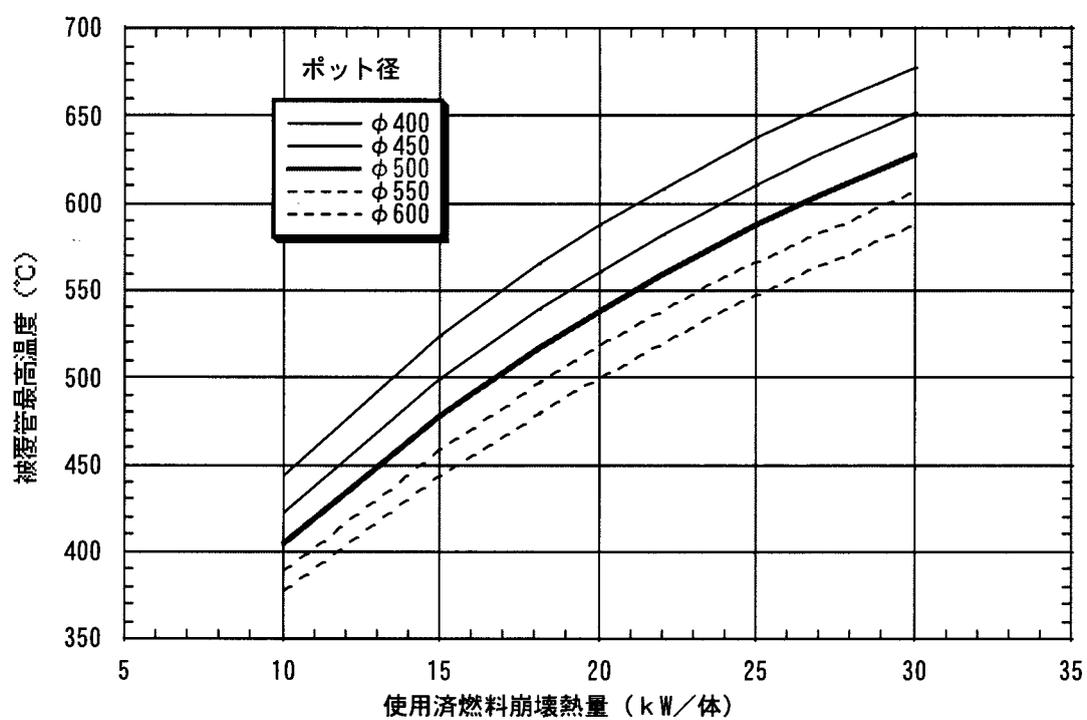


図 4.1-4 ナトリウムポット間接冷却時の発熱量と被覆管温度の関係  
(フィン付 2 集合体ポット)

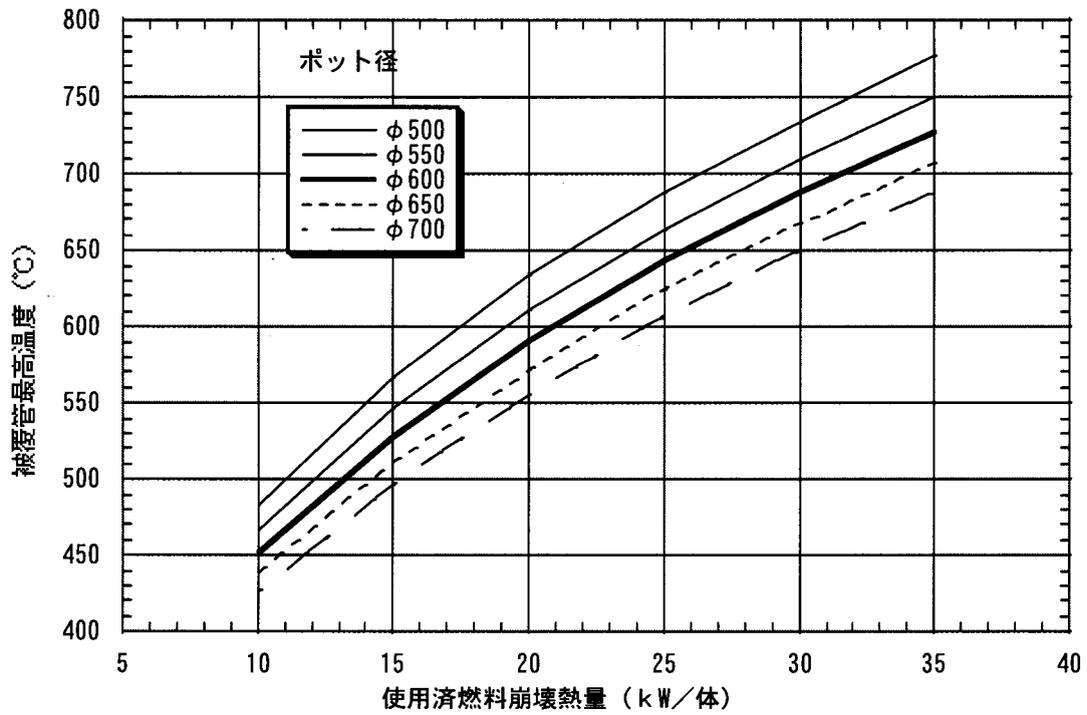


図 4.1-5 ナトリウムポット間接冷却時の発熱量と被覆管温度の関係  
(フィンなし 2 集合体ポット)

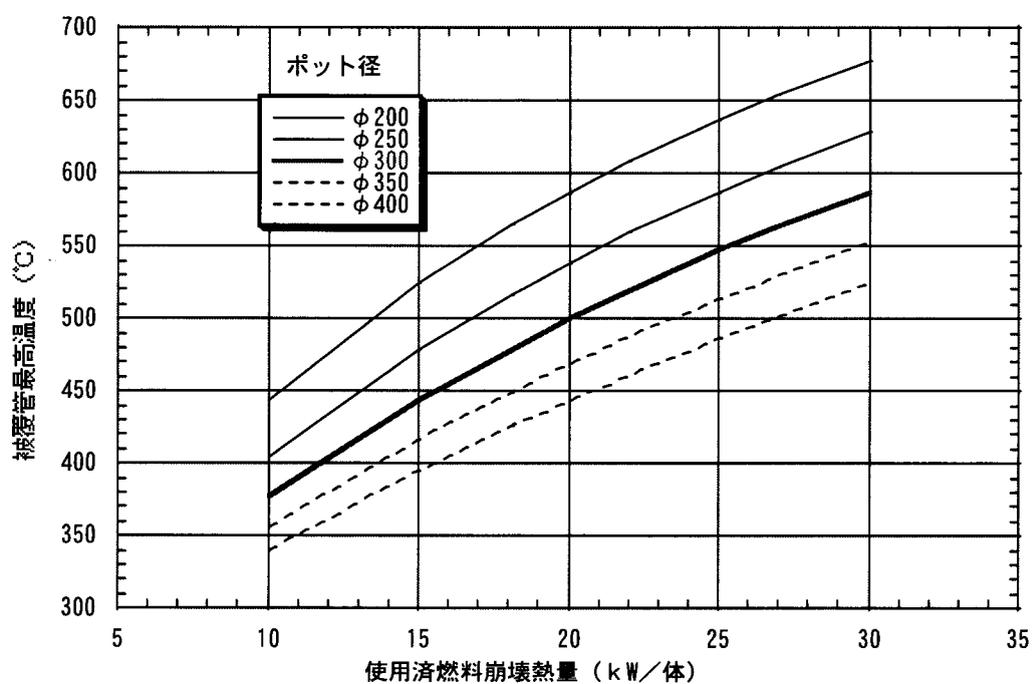


図 4.1-6 ナトリウムポット間接冷却時の発熱量と被覆管温度の関係  
(フィン付1集合体ポット)

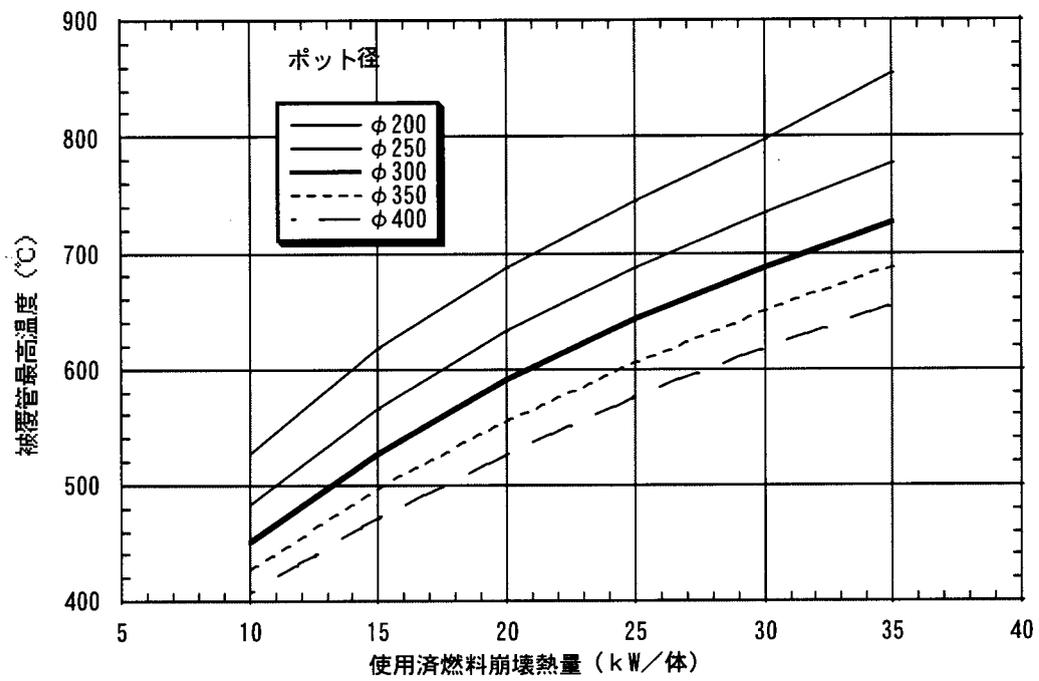


図 4.1-7 ナトリウムポット間接冷却時の発熱量と被覆管温度の関係  
(フィンなし1集合体ポット)

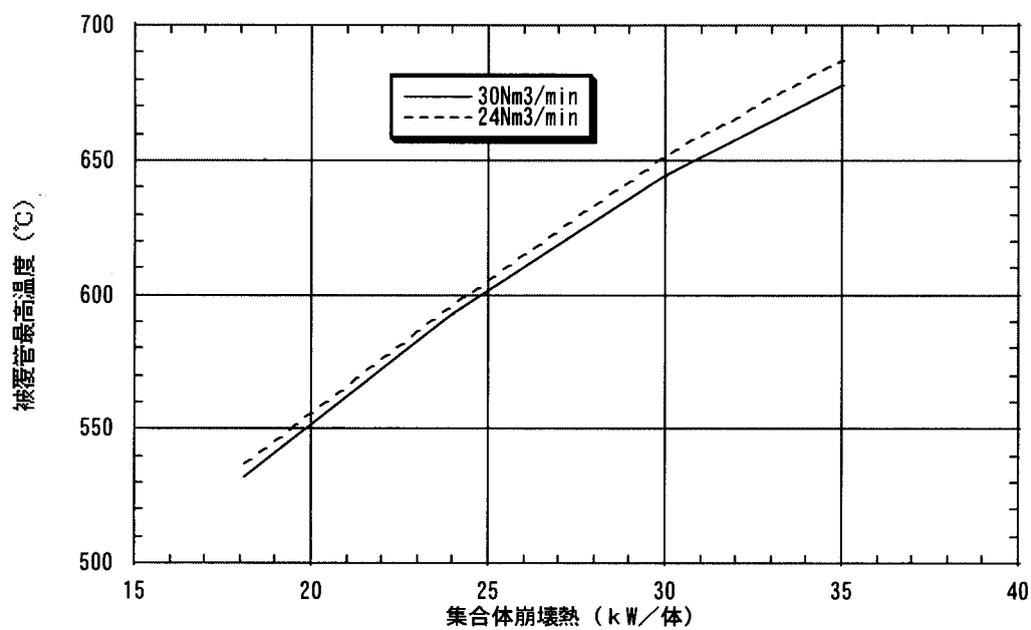


図 4.1-8 ナトリウムポット間接冷却時の冷却空気流量の影響

## 4.2 ナトリウムポット間接冷却一部喪失

### (1) 概要

原子炉から EVST (EVST 方式) またはナトリウム予熱槽 (水プール直接貯蔵方式) に未減衰燃料を移送する際には未減衰燃料をナトリウムポットに収納して移送する。この間は取扱時間が短いため無冷却で移送を行い、移送系が故障したときのみナトリウムポットを間接冷却することにより除熱が確保される。ただし、ナトリウムポットがドアバルブを通過する際にはドアバルブ部分において冷却経路を確保できないため、除熱性が厳しくなる可能性がある。ここではドアバルブ通過時にナトリウムポットが停止した場合を想定して、3体の集合体を収納するナトリウムポットについて除熱性を評価した。

### (2) 検討条件

検討条件は基本的には 4.1 節と同等である。ただし、ナトリウムポット仕様としては、フィン付 3 集合体ポット (外径 700mm) を用いた。また、使用済燃料 1 体当たりの発熱量は 24kW として評価を行った。ナトリウムポットの停止位置および間接冷却が不可能な範囲をパラメータとして以下のケースの除熱評価を行った (図 4.2-1 参照)。

	断熱部位置	断熱部長さ
基準ケース	断熱部なし	0m
ケース 1	ポット下部	1 m (ドアバルブ 0.4m、上下各 0.3m)
ケース 2	ポット上部	1 m (ドアバルブ 0.4m、上下各 0.3m)
ケース 3	ポット上部	0.5m (ドアバルブ 0.4m、上下各 0.05m)

### (3) 検討結果

3 集合体ポットにおける各ケースの温度分布、流況を断熱部がない基準ケースと比較して図 4.2-2～図 4.2-5 に示す。被覆管最高温度と集合体下部プレナム部の温度を以下にまとめる。

	被覆管最高温度	集合体下部プレナム温度
基準ケース	593℃	383℃
ケース 1	595℃	525℃
ケース 2	687℃	374℃
ケース 3	628℃	390℃

下部プレナムを断熱としたケース 1 では下部プレナムの温度が基準ケースの 383℃に対して 525℃と 150℃程度増加している。ただし、被覆管最高温度については基準ケース 593℃に対して 595℃とほとんど変化しないことが明らかになった。

上部プレナムを断熱としたケース 2 では被覆管最高温度が基準ケースの 593℃に対して 687℃となり、90℃程度増加し、短期間の制限温度目安である 630℃を大きく上回ることが明らかになった。ただし、断熱部をケース 2 の 1m から 0.5m に短縮した場合であるケース 3 においては、被覆管最高温度は 628℃であり、短期間の制限温度目安は満たされる可能性があることがわかった。

#### (4) まとめ

ナトリウムポットがドアバルブ位置で停止した場合において、ナトリウムポットの間接冷却経路が一部喪失することを考慮すると、フィン付 3 集合体ポット、外径 700mm、集合体発熱量 24kW/体の条件では被覆管最高温度は 687℃に達し、短期間の制限温度目安である 630℃を大きく上回ることが明らかになった。このため移送系の多重化等によりナトリウムポットがドアバルブ位置で停止することを防止する設備対応が必要になると考えられる。

ただし、集合体およびナトリウムポットの熱容量を考慮すれば事象は緩慢であると予想され、燃料破損に至るには時間余裕があると考えられる。今後、過渡的な解析をおこなって燃料破損に至る時間余裕を考慮した上でナトリウムポット仕様および移送系故障の対策設備の設計に反映する必要がある。

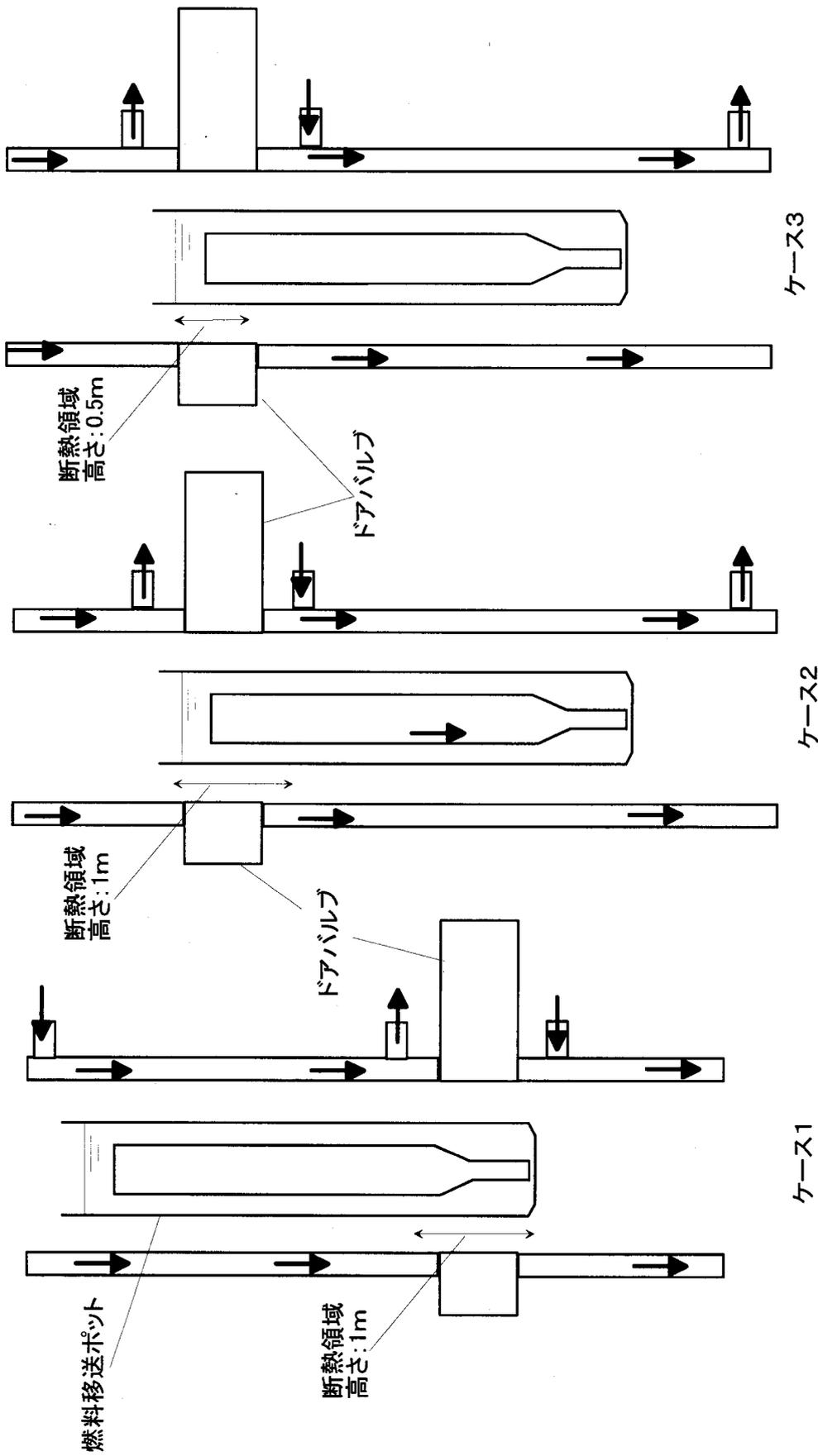


図 4.2-1 ナトリウムポット間接冷却一部喪失の解析体系

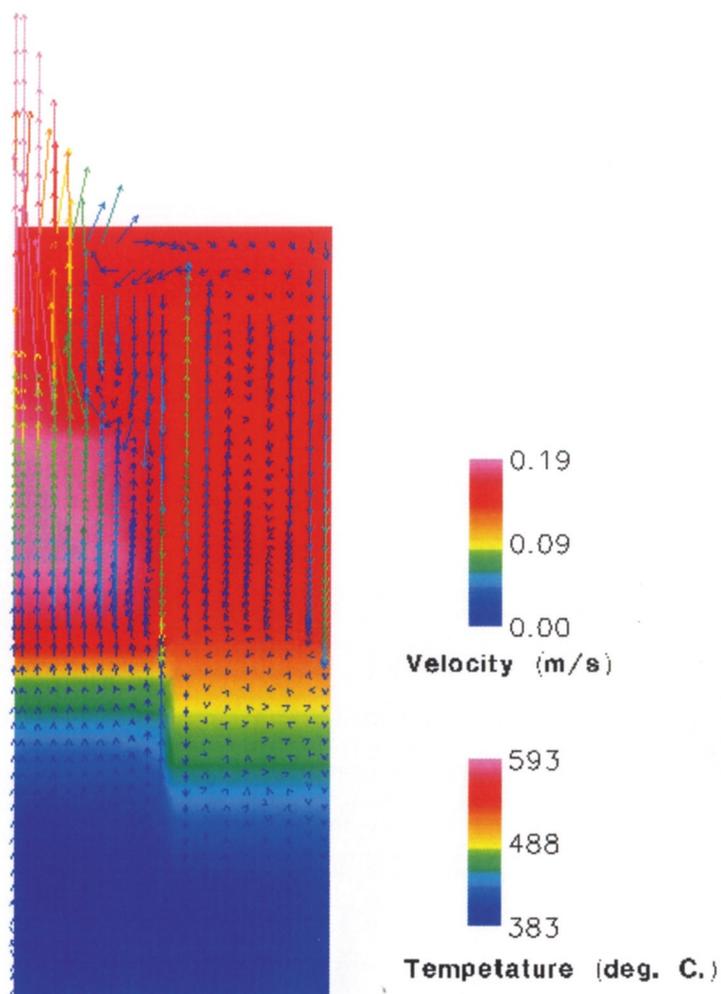


図 4.2-2 ナトリウムポット間接冷却解析結果（冷却喪失部なし）

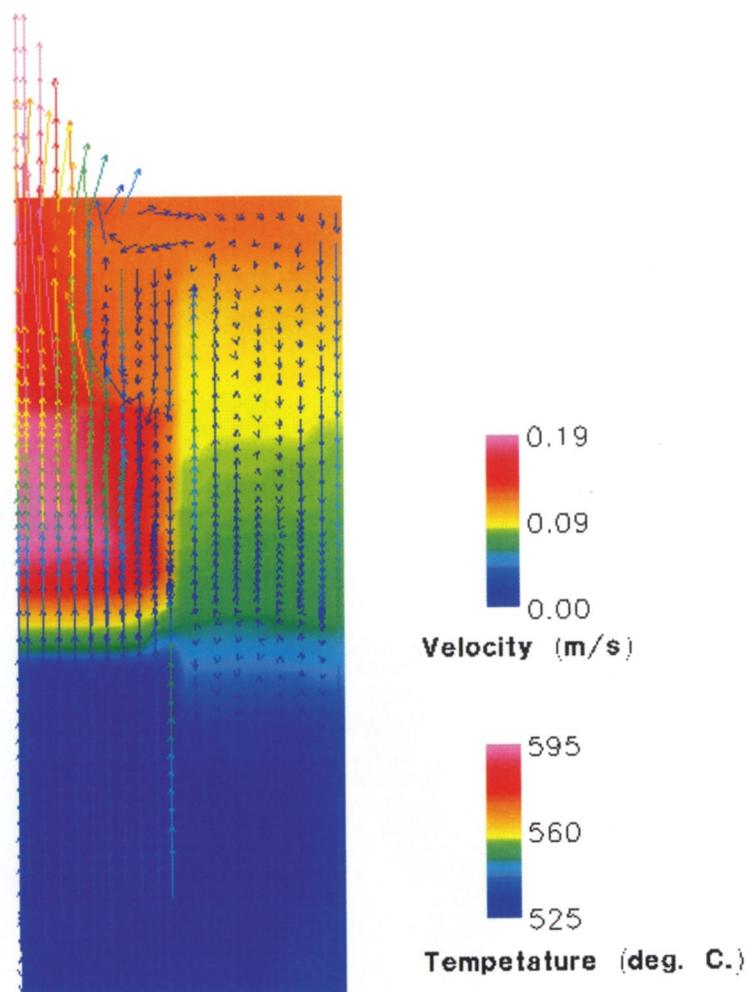


図 4.2-3 ナトリウムポット間接冷却一部喪失解析結果（ケース1）

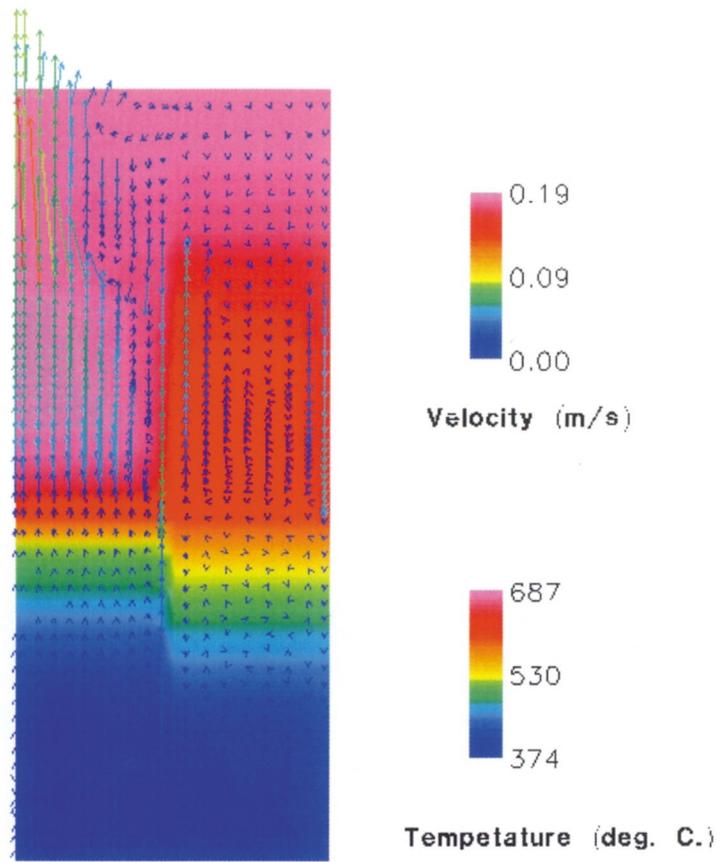


図 4.2-4 ナトリウムポット間接冷却一部喪失解析結果（ケース 2）

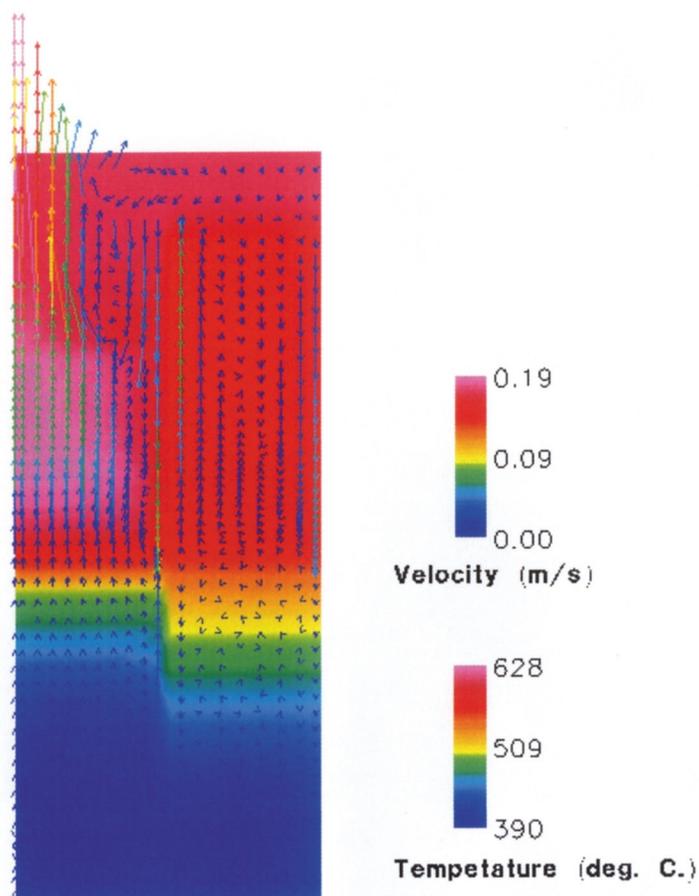


図 4.2-5 ナトリウムポット間接冷却一部喪失解析結果 (ケース 3)

### 4.3 使用済燃料直接冷却

#### (1) 概要

水プール直接貯蔵方式においては高発熱の未減衰使用済燃料を直接冷却しつつ移送する。このときの必要なガス流量を評価した。また、冷却ガス流量および集合体の発熱条件を変えた場合の被覆管温度および圧力損失を外挿評価して EVST 方式の場合と冷却条件の比較を行った。

#### (2) 検討条件

使用済燃料を直接ガスで冷却した場合の温度分布評価はガス冷却炉の過渡解析コード MR-X[3]を用いて行った。使用済燃料仕様はナトリウム冷却中型炉の ABLE 型均質炉心とした。使用済燃料および冷却系検討条件を以下に示す。

##### (使用済燃料)

発熱量	22kW/体 (ナトリウム冷却中型炉) 10kW/体 (サーベイ用)
燃料集合体内対面距離	150.5mm
燃料ピン本数	217 本
燃料ピンピッチ	10.03mm
燃料ピン外径	8.5mm
燃料ピン内径	7.5mm
スパーサワイヤ径	1.48mm
スパーサワイヤ巻付ピッチ	200mm
燃料部高さ	900mm
燃料ピン長さ	2630mm (暫定) *1
燃料軸方向発熱分布	チョップトコサイン分布
軸方向ピーキング係数	1.25
ブランケット部発熱	無視

##### (冷却系)

冷却ガス	アルゴンガス
入口温度	50℃
圧力	大気圧*2
冷却条件	被覆管最高温度 200℃*3
ラッパ管外側冷却	無視

\*1: 集合体圧力損失は集合体構造が未定のため、燃料ピンを 1.25 倍の 3300mm とし

て評価した。

\*2：圧力損失が大きい場合には出入口平均圧力を用いてガス圧力を評価

\*3：使用済燃料の水浸漬時の被覆管制限温度

(3) 高発熱燃料直接冷却時のガス流量評価

高発熱使用済燃料を直接冷却した場合のガス流量評価を過渡解析コード MRX を用いて行った。被覆管温度分布を集合体発熱量 22kW/体について図 4.3-1、10kW/体について図 4.3-2 に示す。水プール浸漬時の被覆管制限温度である 200℃を満たす場合の被覆管最高温度、ガス出口温度、ガス流量、圧力損失を以下に示す。

発熱量	被覆管温度	ガス出口温度	ガス流量	圧力損失
22kW	186℃	169℃	12Nm <sup>3</sup> /min	0.230MPa
10kW	182℃	168℃	5.5Nm <sup>3</sup> /min	0.052MPa

22kW の高発熱燃料を取扱う場合、ガス流量は 12Nm<sup>3</sup>/min に達し、圧力損失は 0.23MP と大きくなり、集合体部にガスが流れるように設備対策が必要になる可能性がある。

(4) 発熱量およびガス流量の影響評価

上記の解析結果を基準としてガス流量および使用済燃料からの発熱量が変化した場合の影響を簡易的に評価した。圧力損失は流量の 2 乗に比例することを仮定して以下の式で評価する。

$$\Delta P = \Delta P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2$$

$\Delta P$  : 流量  $V$  における圧力損失

$V_0$  : 基準流量

$P_0$  : 基準圧力

被覆管温度はガス出口温度がガス流量に反比例し、被覆管と冷却ガスの熱伝達係数が流速の 0.8 乗に比例することを仮定して以下の式で評価する。

$$T_p = T_i + (T_{o,0} - T_{i,0}) \left( \frac{V_0}{V} \right) \left( \frac{Q}{Q_0} \right) + (T_{p,0} - T_{o,0}) \left( \frac{V_0}{V} \right)^{0.8} \left( \frac{Q}{Q_0} \right)$$

$Q$	: 集合体発熱量
$T_p$	: 被覆管温度
$T_i$	: ガス入口温度
$T_o$	: ガス出口温度

上記手法を用いて評価した冷却ガス流量と被覆管制限温度と圧力損失の関係を図 4.3-3～図 4.3-7 に示す。水浸漬時の被覆管制限温度を緩和することが可能な場合は冷却ガス流量を大幅に低減することが可能と考えられる。例えば被覆管制限温度を 300℃に緩和した場合は、冷却ガス流量 7Nm<sup>3</sup>/min、圧損 0.08MPa となり被覆管制限温度 200℃の場合と比較して流量 4 割と圧損 6 割を削減できる。

EVST 方式の場合は減衰後の集合体発熱量を 4kW 程度とした場合は、冷却ガス流量は 2.5Nm<sup>3</sup>/min、圧損は約 0.01MPa において被覆管制限温度を満たす設計が可能であると考えられる。

#### (5) まとめ

過渡解析コードを使用して高発熱燃料を直接冷却した場合の冷却ガス流量および圧力損失を評価した。集合体発熱量が 22kW の場合は被覆管制限温度を 200℃とすると冷却ガス流量 12Nm<sup>3</sup>/min、圧力損失 0.23MPa と大きくなり、冷却ガスが集合体内部に流れるように設備対応が必要であると考えられる。

また、解析結果を基準としてガス流量および使用済燃料からの発熱量が変化した場合の影響を簡易的に評価した。被覆管制限温度を 300℃に緩和した場合の冷却条件への影響は大きく冷却ガス流量 7Nm<sup>3</sup>/min、圧損 0.08MPa となり、冷却系設備は大幅に合理化可能になると考えられる。

EVST 方式の場合は減衰後の集合体発熱量を 4kW 程度とした場合は、冷却ガス流量は 2.5Nm<sup>3</sup>/min、圧損は約 0.01MPa において被覆管制限温度を満たす設計が可能であると考えられ水プール直接貯蔵方式と比較して冷却系設備に課題はないと考えられる。

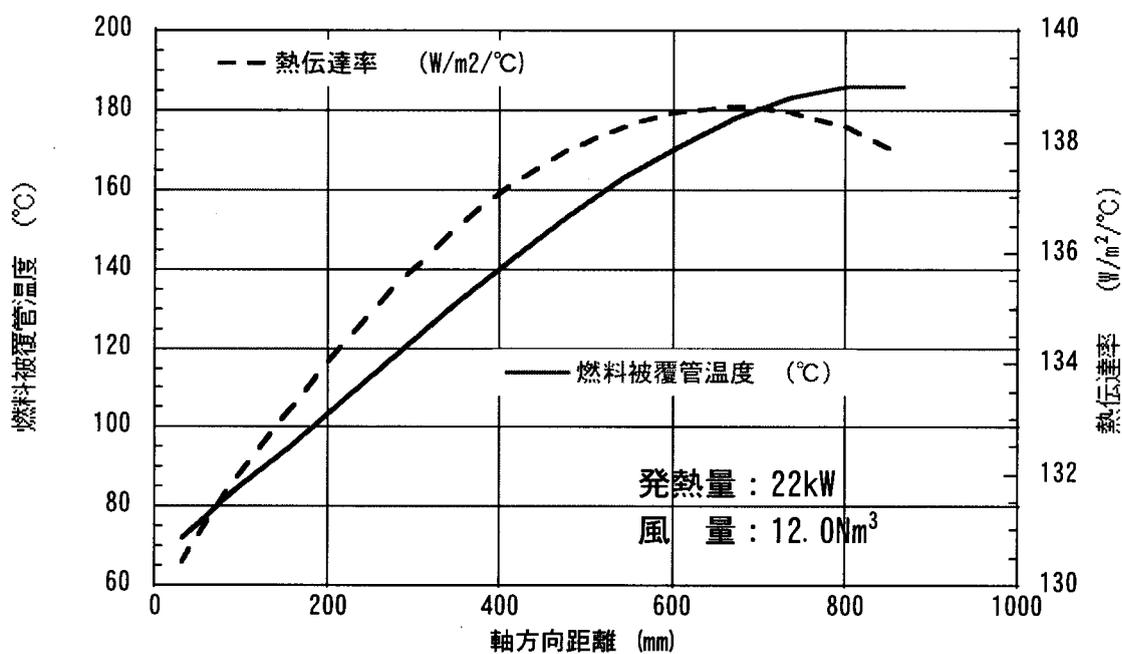


図 4.3-1 直接冷却時の被覆管温度分布 (22kW/体)

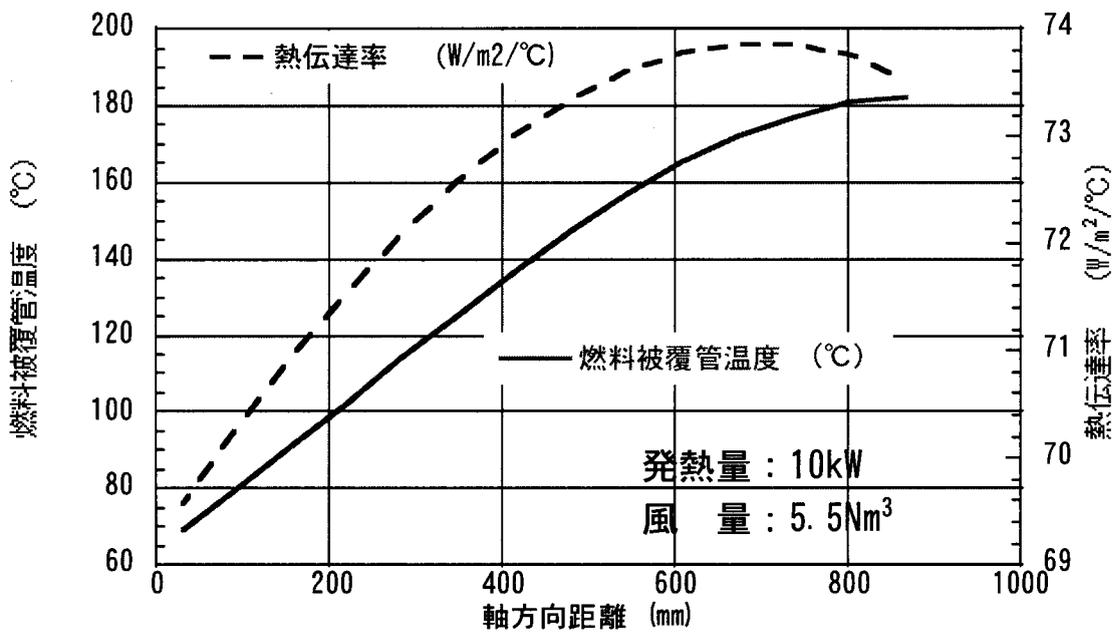


図 4.3-2 直接冷却時の被覆管温度分布 (10kW/体)

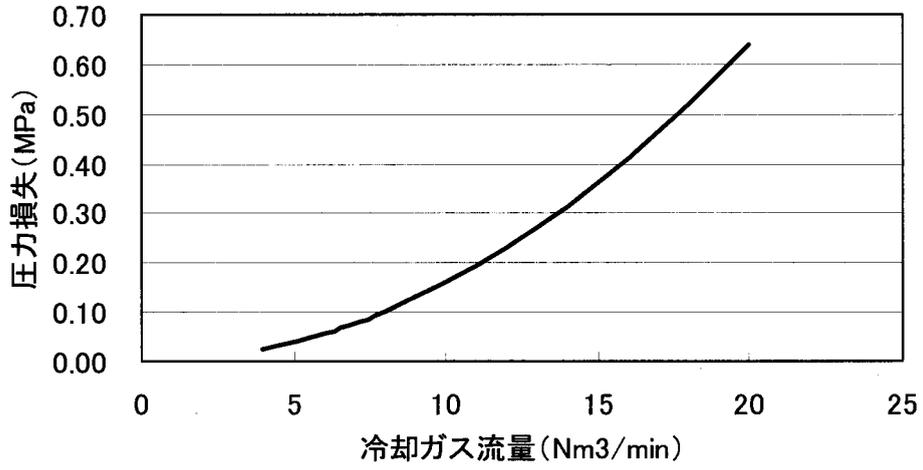


図 4. 3-3 直接冷却時の冷却ガス流量と圧力損失の関係 (22kW)

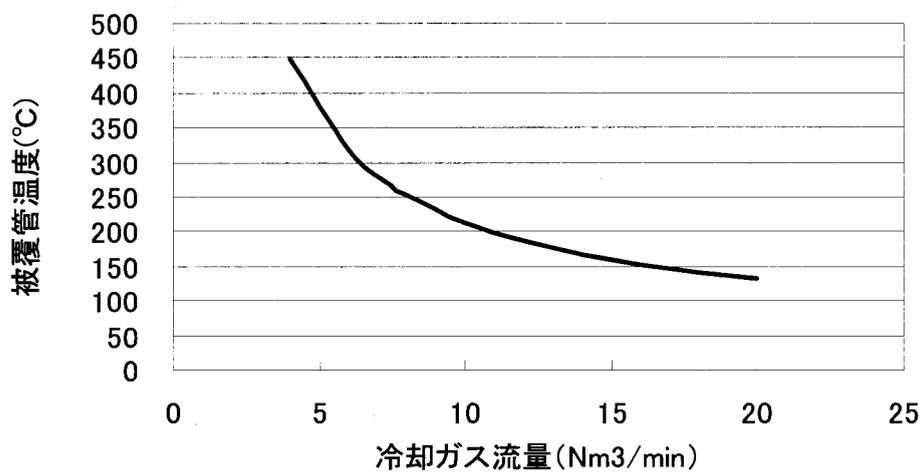


図 4.3-4 直接冷却時の冷却ガス流量と被覆管温度の関係 (22kW)

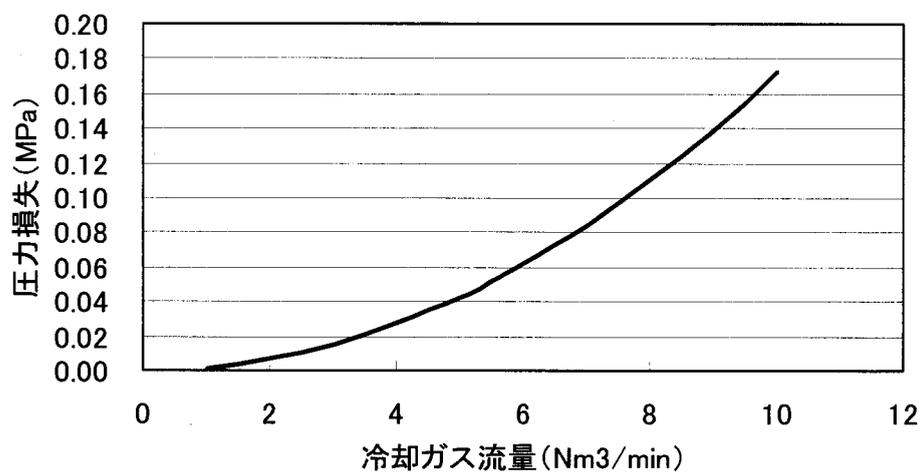


図 4.3-5 直接冷却時の冷却ガス流量と圧力損失の関係 (10kW)

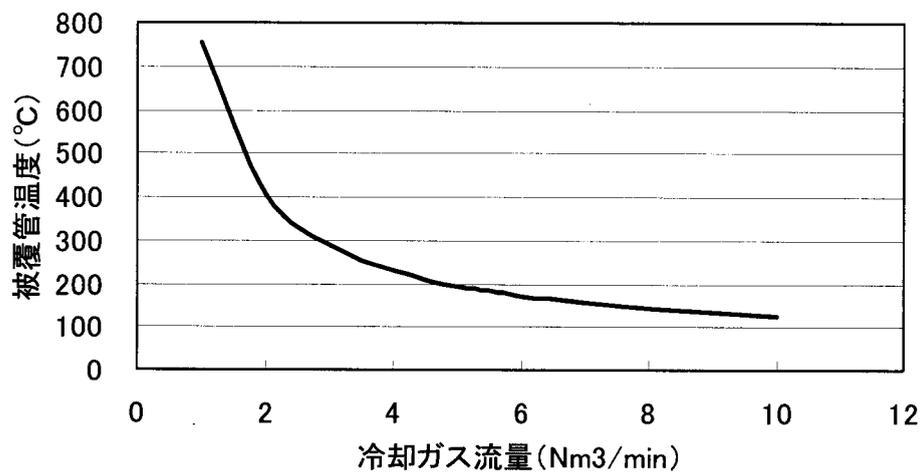


図 4.3-6 直接冷却時の冷却ガス流量と被覆管温度の関係 (10kW)

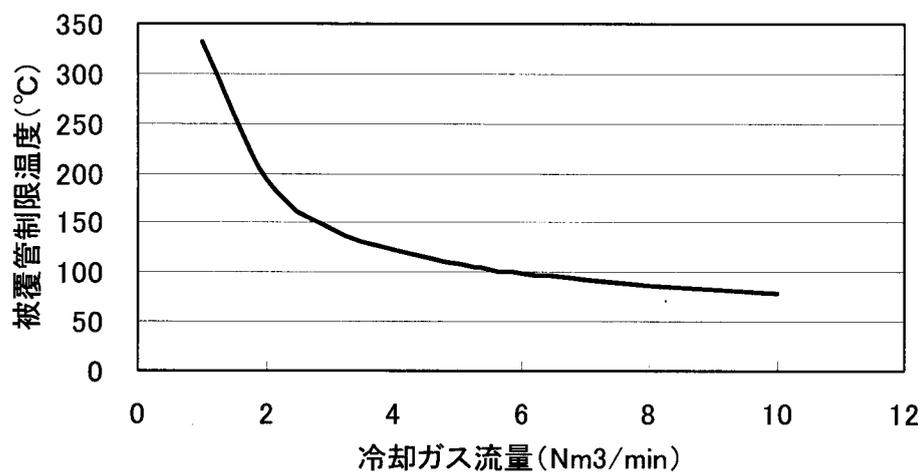


図 4.3-7 直接冷却時の冷却ガス流量と被覆管温度の関係 (4kW)

#### 4.4 使用済燃料直接冷却喪失

##### (1) 概要

水プール直接貯蔵方式においては原子炉から水プールに燃料を移送する際にアルゴンガスによる直接冷却により除熱を確保する。冷却系は多重化されているが、BDBE 事象として集合体ノズルがナトリウムまたは水中にあるときに移送系の故障があった場合にはアルゴンガスによる直接冷却の経路が確保できずに、除熱が喪失する可能性がある。ここではそのときの直接冷却が喪失したときに燃料破損にいたるまでの時間的な余裕を評価した。また、アクシデントマネージメント時間を 1 時間として、除熱喪失時においてもアクシデントマネージメントが可能となる集合体発熱量を概略評価した。

##### (2) 検討条件

温度分布評価は有限要素解析により行った。使用済燃料仕様はナトリウム冷却中型炉の ABLE 型均質炉心とした。燃料ピンモデルを図 4.4-1 に示す。使用済燃料および冷却系検討条件を以下に示す。

(使用済燃料)	
発熱量	22kW/体 (ナトリウム冷却中型炉) 10kW/体 (サーベイ用)
燃料集合体内対面距離	150.5mm
燃料ピン本数	217 本
燃料ピンピッチ	10.03mm
燃料ピン外径	8.5mm
燃料ピン内径	7.5mm
スパーサワイヤ径	1.48mm
スパーサワイヤ巻付ピッチ	200mm
燃料部高さ	900mm
燃料ピン長さ	2630mm (暫定)
燃料軸方向発熱分布	チョップトコサイン分布
軸方向ピーキング係数	1.25
ブランケット部発熱	無視

冷却条件としては保守的に輻射およびガスの自然対流は考慮せずに熱伝導のみを評価した。クリープ損傷の評価方法については 5 章に記述する。

使用済燃料の発熱量と初期温度の組み合わせとしては以下の 4 ケースを実施した。

	発熱量	初期被覆管温度	移送系故障想定位置
ケース a	10kW/体	200℃	EVST
ケース b	10kW/体	182℃	水プール
ケース c	22kW/体	400℃	予熱槽
ケース d	22kW/体	186℃	水プール

### (3) 検討結果

燃料要素各部の温度分布をケース b について図 4.4-2、ケース d について図 4.4-3 に示す。燃料要素のうち燃料軸方向中心部の被覆管温度がもっとも厳しくなることがわかった。

燃料中心部の被覆管温度および CDF の時間変化を図 4.4-4～図 4.4-7 に示す。また、燃料破損防止の目安である CDF=0.1 (Sr ベース) に到達する時間を表 4.4-1 に示す。水プール直接貯蔵方式においては集合体発熱量は 22kW と想定されるため、CDF が 0.1 に達するまでの時間余裕は被覆管初期温度が 400℃ のときに 7min (ケース c)、186℃ の時に 12 分 (ケース d) であり短く、集合体エントランスノズルがナトリウムまたは水に浸漬した状態で移送系が故障した場合にアクシデントマネージメントは困難であると考えられる。

CDF が 0.1 に到達するのに必要な時間が集合体発熱量に反比例することを仮定して、被覆管初期温度が 200℃ の場合に集合体発熱量と CDF が 0.1 に達する時間の関係の評価したものを図 4.4-8 に示す。アクシデントマネージメントに少なくとも 1 時間は必要と考えると集合体の発熱量を 4kW 以下にする必要があることがわかった。

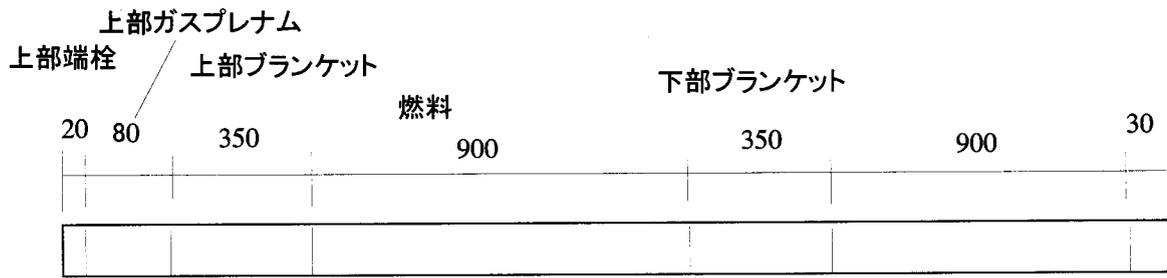
### (4) まとめ

水プール直接貯蔵方式においては集合体発熱量は 22kW と想定されるため、除熱喪失時には CDF が 0.1 に達するまでの時間余裕は被覆管初期温度が 400℃ のときに 7min (ケース c)、186℃ の時に 12 分 (ケース d) であり短く、集合体エントランスノズルがナトリウムまたは水に浸漬した状態で移送系が故障した場合にアクシデントマネージメントは困難であると考えられる。集合体エントランスノズルがナトリウムまたは水に浸漬した状態で移送系が故障する事象は使命時間が短いため BDBE と想定しているが、移送系の多重化等の設備対応を行う必要があると考えられる。

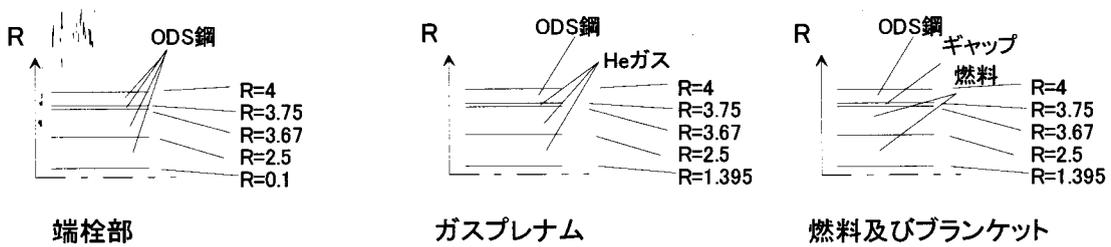
また、簡易評価の結果アクシデントマネージメントに少なくとも 1 時間は必要と考えると集合体の発熱量を 4kW 以下にする必要があることがわかった。

表4. 4-1 直接冷却喪失時の被覆管制限温度温度到達時間

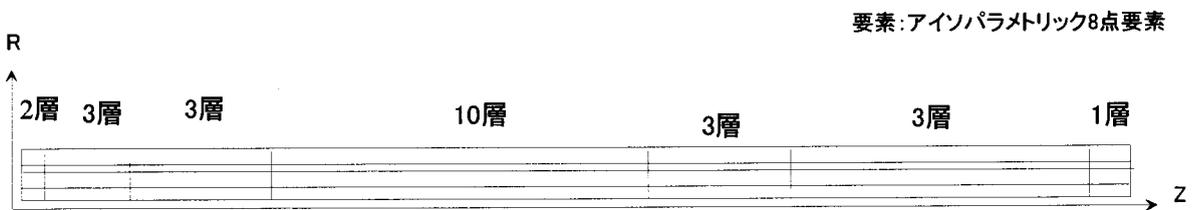
解析ケース	発熱量	初期温度	昇温速度	CDF=0.1到達	700°C到達
	kW	°C	°C/min	min	min
ケースa	10	200	23	24	22
ケースb	10	182	23	27	23
ケースc	22	400	52	7	6
ケースd	22	186	52	12	10
ケースa'	4	200	9	60	55



(a) 想定した各部寸法



(b) 径方向要素分割(4層の要素)



(c) 軸方向要素分割イメージ(軸対称回転体モデル)

図 4. 4-1 直接冷却喪失時解析における計算体系

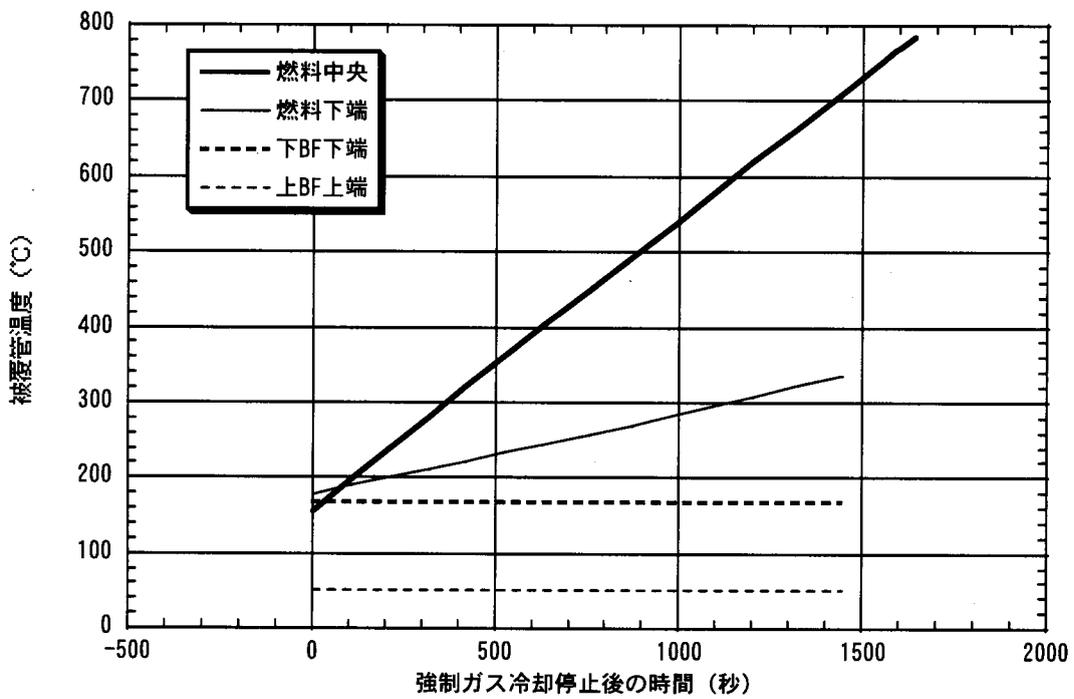


図 4. 4-2 直接冷却喪失時の燃料要素各部の温度上昇 (ケース b)  
 集合体発熱量 : 10kW、被覆管初期温度 : 182°C

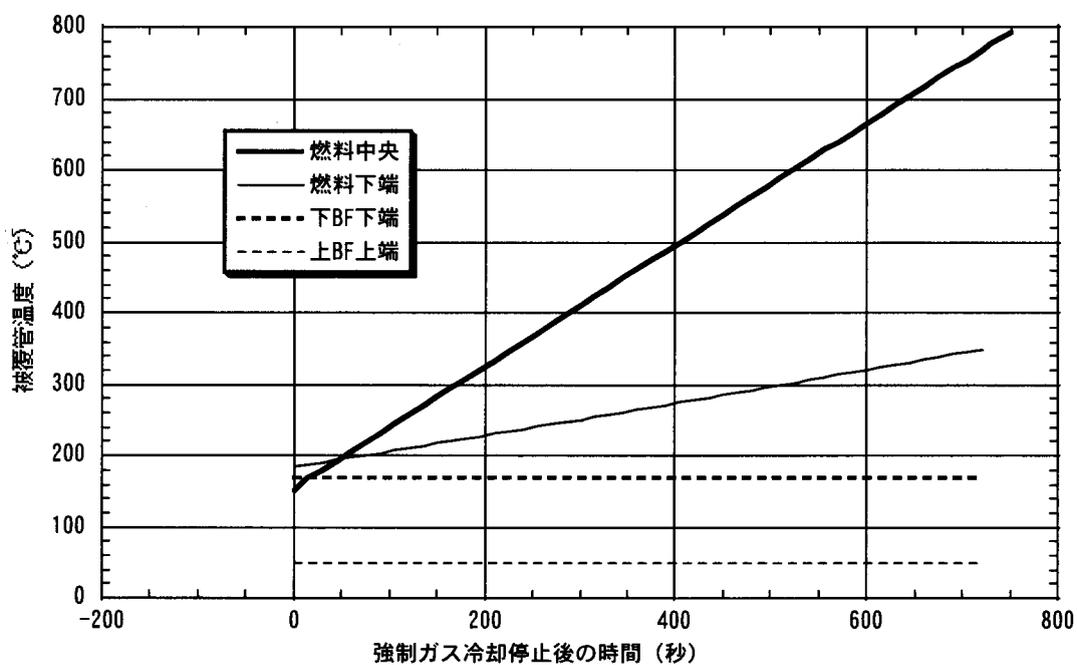


図 4.4-3 直接冷却喪失時の燃料要素各部の温度上昇 (ケース d)  
 集合体発熱量 : 22kW、被覆管初期温度 : 186°C

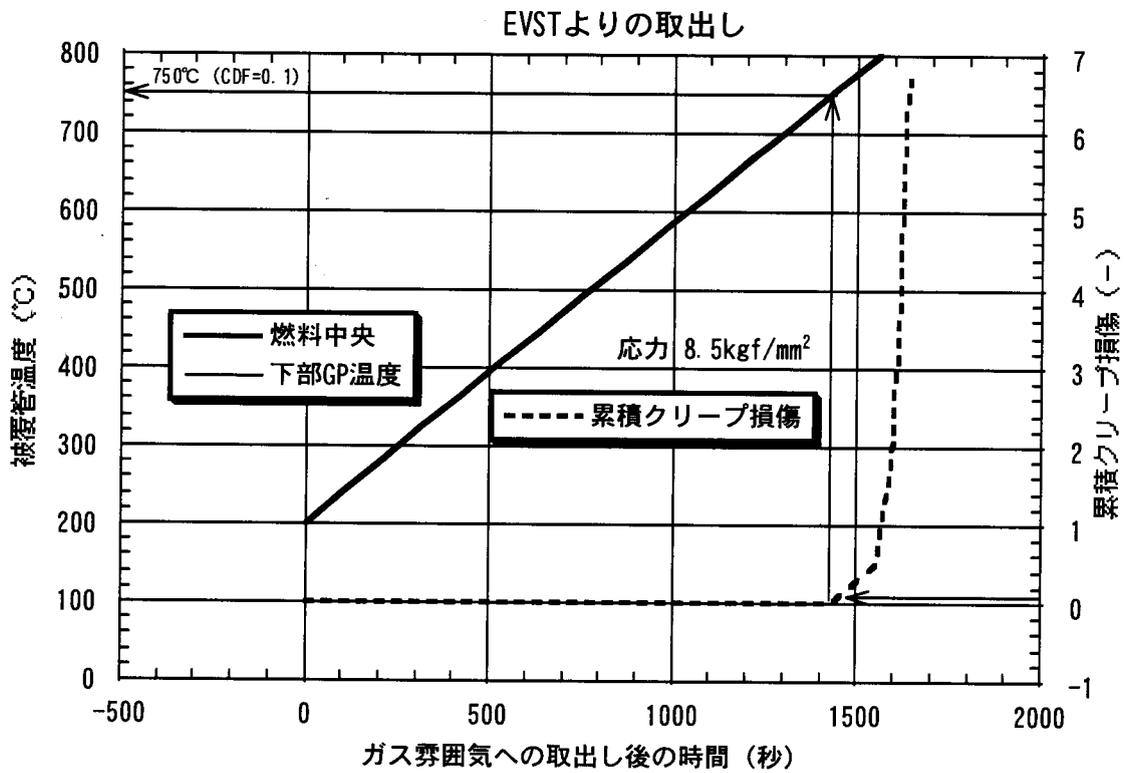


図 4.4-4 直接冷却喪失時のクリープ損傷評価 (ケース a)  
 集合体発熱量 : 10kW、被覆管初期温度 : 200°C

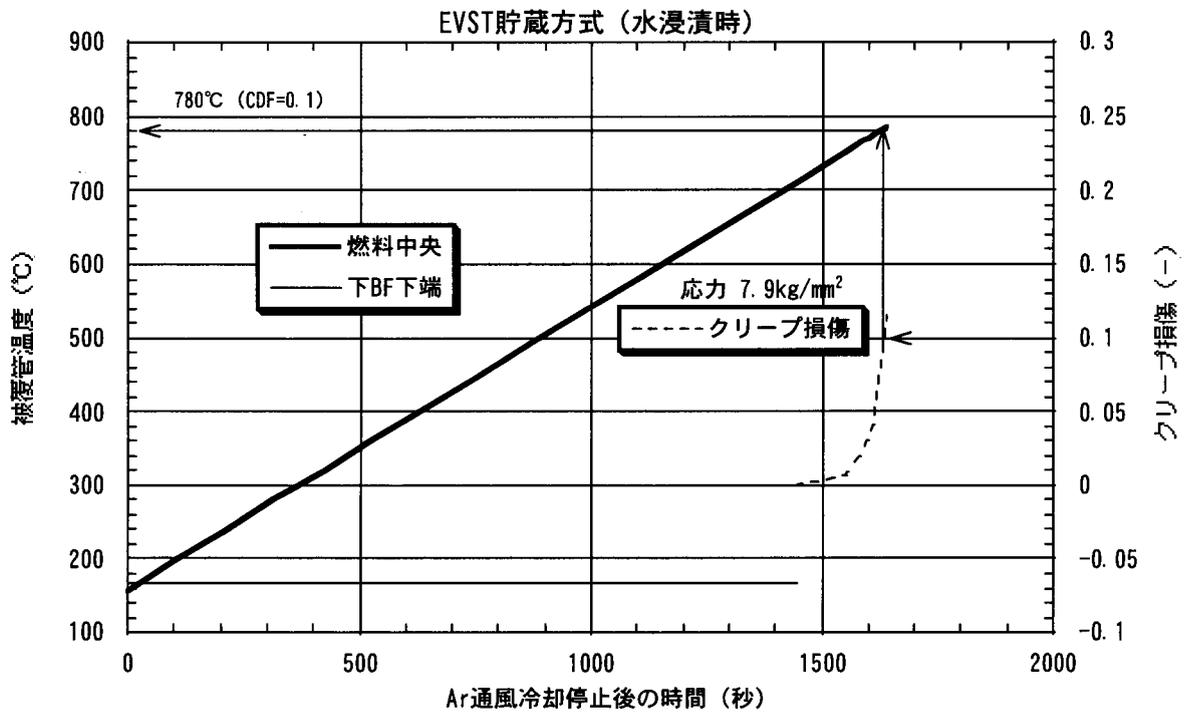


図 4.4-5 直接冷却喪失時のクリープ損傷評価（ケース b）  
 集合体発熱量：10kW、被覆管初期温度：182°C

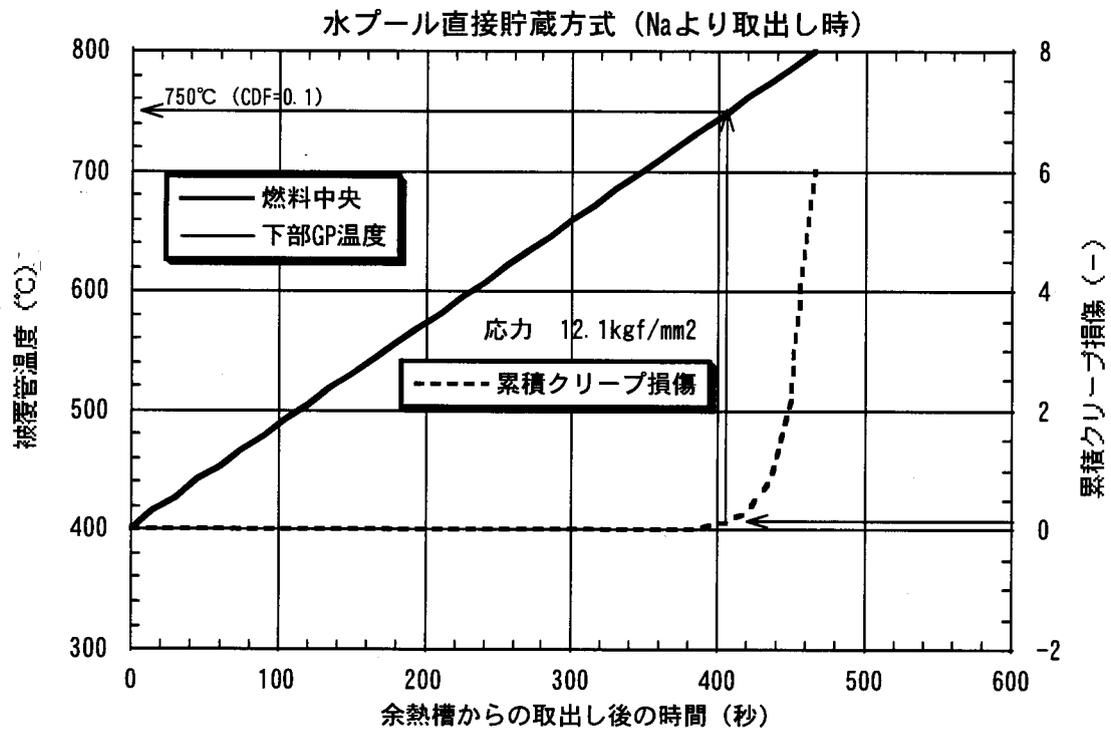


図 4. 4-6 直接冷却喪失時のクリープ損傷評価 (ケース c)  
 集合体発熱量 : 22kW、被覆管初期温度 : 400°C

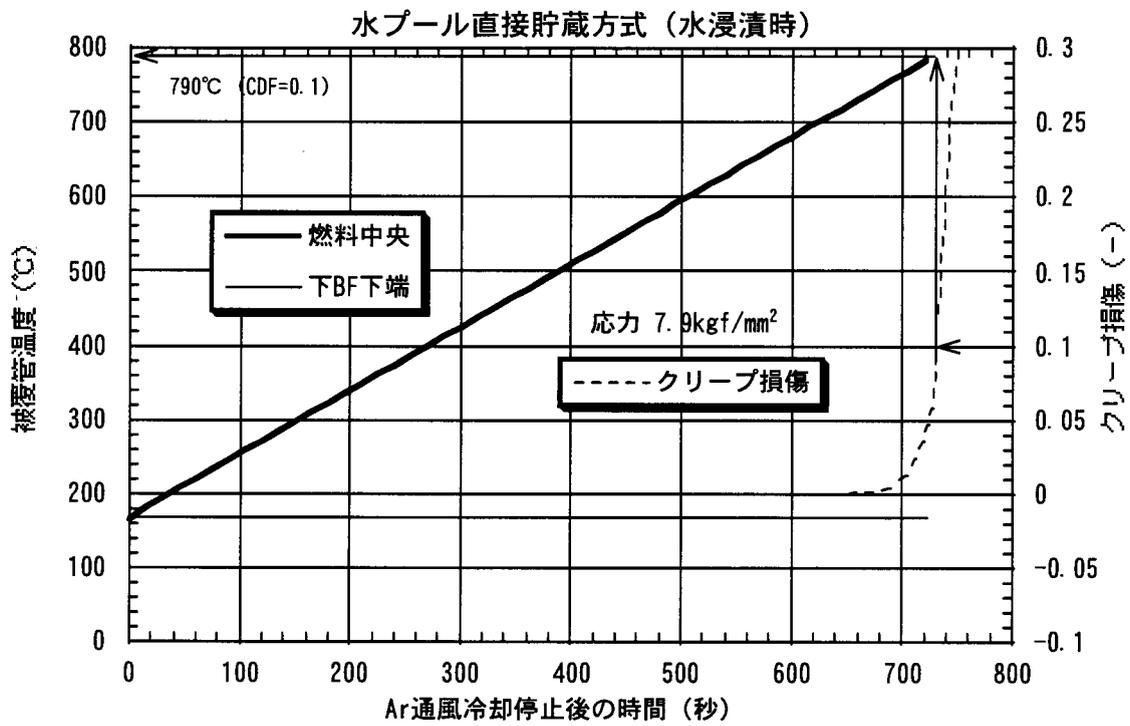


図 4.4-7 直接冷却喪失時のクリープ損傷評価（ケース d）  
 集合体発熱量：22kW、被覆管初期温度：186°C

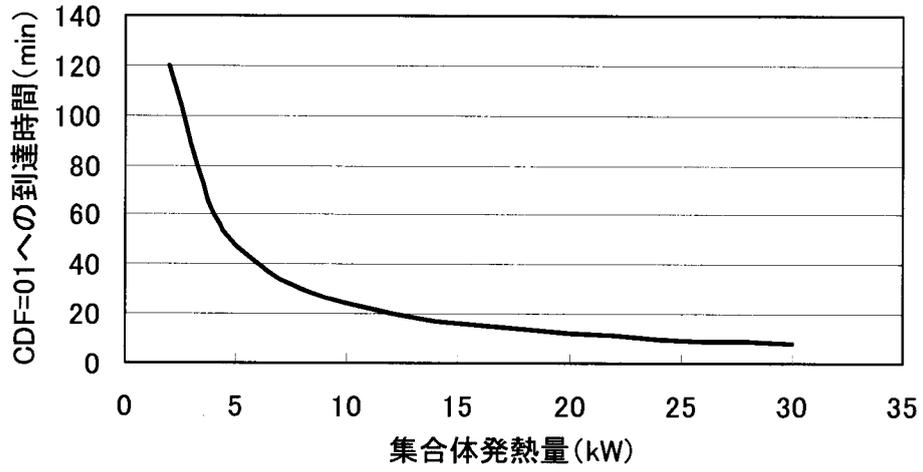


図 4. 4-8 直接冷却喪失時の発熱量と CDF=0. 1 に達する時間の関係

#### 4.5 破損燃料ナトリウムポット間接冷却

##### (1) 概要

破損燃料の早期原子炉容器搬出が可能であればプラント稼働率の向上につながる。この場合集合体発熱量は通常の使用済燃料より増加する。また、破損拡大防止および検査の観点から低い被覆管制限温度が要求される。このため通常の使用済燃料が無冷却で移送されるのに対し、破損燃料移送時にはナトリウムポットに一体の破損燃料を収納して間接冷却を行いつつ移送することを想定している。ここでは破損燃料の早期原子炉搬出が可能となるナトリウムポット仕様を検討した。

##### (2) 検討条件

検討方法および検討条件は 4.1 節の使用済燃料ナトリウムポット間接冷却と同等とする。ただし、早期に原子炉容器から搬出する観点から、破損燃料の発熱量は原子炉停止後早期の取扱いを想定して 30～45kW とした。被覆管制限温度は暫定的に 450℃ とした。ポット径については 4.1 節を参考に通常の使用済燃料移送の制限条件を満たす仕様を検討ケースとして選定した。以下に検討条件をまとめた。

集合体発熱量	30～45kW
ナトリウムポット径 (フィンなし)	300mm (1 集合体ポット相当)
	600mm (2 集合体ポット相当)
(フィン付)	500mm (2 集合体ポット相当)
	600mm (3 集合体ポット相当)
被覆管制限温度	450℃ (暫定)

##### (3) 検討結果

破損燃料をナトリウムポットに収納した状態で間接冷却を行った場合の集合体発熱量と被覆管温度の関係を図 4.5-1 に示す。集合体発熱量 30～45kW、被覆管制限温度目安を 450℃ とすると、フィンなしポットでは成立する範囲がないことが明らかになった。フィン付ポットの場合はポット径 600mm (3 集合体ポット相当) において集合体発熱量 30kW では成立するが、集合体発熱量 45kW の場合は被覆管制限温度が 520℃ 程度となり条件を満たさないことがわかった。フィン付ポットの場合でポット径 500mm (2 集合体ポット相当) において被覆管制限温度を満足するためには、集合体発熱量を 26kW 以下にする必要があることがわかった。

##### (4) まとめ

破損燃料を原子炉から早期に搬出することを想定した場合、フィン付のポット径 600mm では集合体発熱量 30kW、ポット径 500mm では集合体発熱量 26kW 以下とする必要があ

ることがわかった。このため破損燃料の早期原子炉容器搬出は前提条件として通常燃料が複数移送用の太径のポットを使用していることと、フィン付ポットであることが必要である。その場合でも集合体発熱量はポット径 600mm で 30kW、ポット径 500mm で 26kW 以下とする必要があることがわかった。

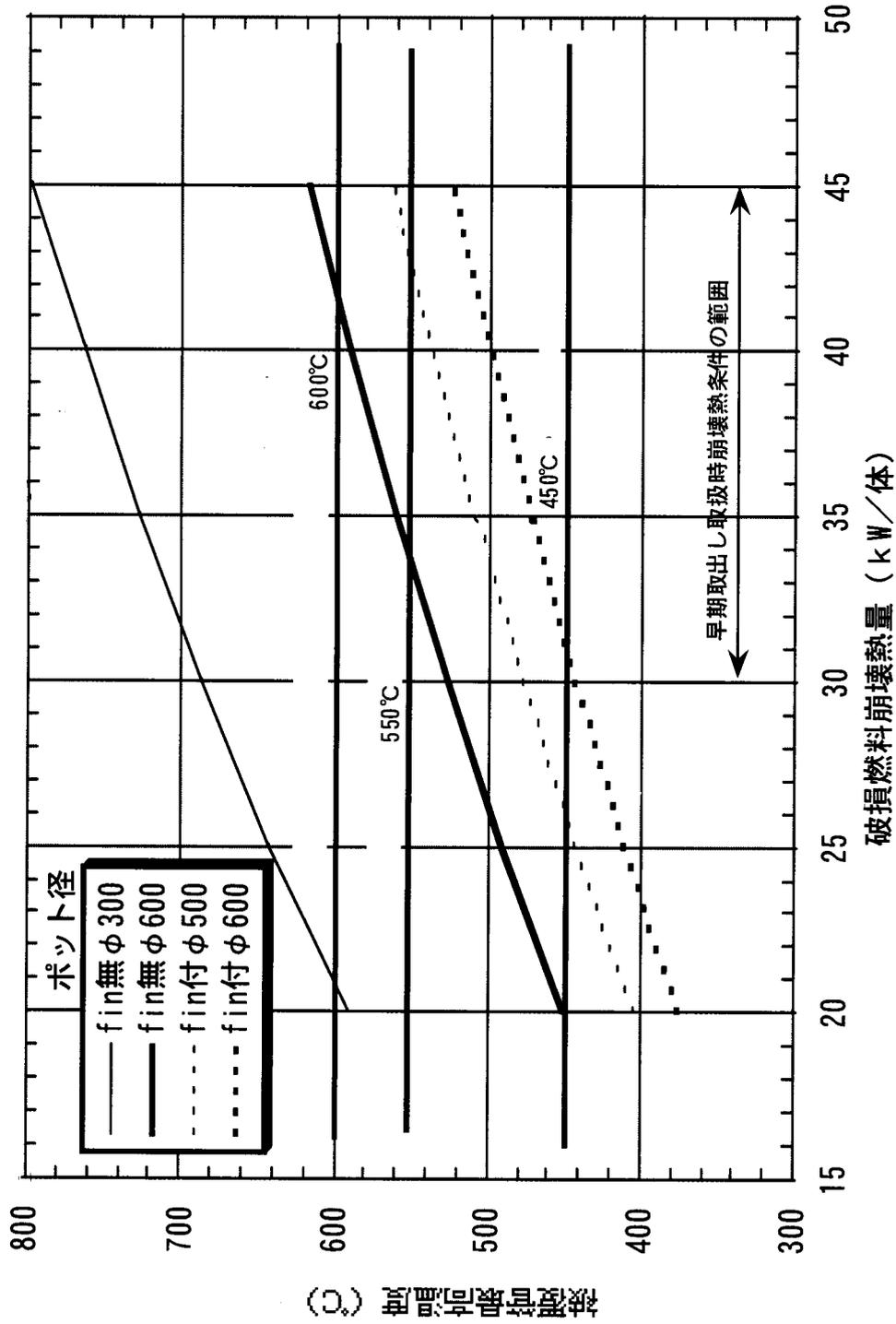


図 4.5-1 破損燃料ナトリウムポット間接冷却時の発熱量と被覆管温度の関係

## 5. 被覆管制限温度評価

ナトリウム冷却大型炉、中型炉では被覆管材料として ODS 鋼を想定している。ここでは ODS 鋼を用いた場合の以下の燃料取扱時の被覆管制限温度を検討した。

- ・使用済燃料ナトリウムポット間接冷却
- ・使用済燃料直接冷却
- ・破損燃料ナトリウムポット間接冷却

## 5.1 使用済燃料ナトリウムポット間接冷却の被覆管制限温度

### (1) 概要

使用済燃料をナトリウムポット間接冷却した場合の被覆管制限温度を評価した。ナトリウムポット移送中に移送系故障により間接冷却を開始した場合の過渡解析を行い被覆管のクリープ損傷を評価した。クリープ損傷が CDF=0.1 を超えることを燃料破損の条件として被覆管制限温度の目安値を評価した。また、崩壊熱減衰を考慮した場合に被覆管制限温度を合理化の可能性を検討した。

### (2) 検討条件

過渡解析については 4.1 節と同等の条件で実施する。ナトリウムポット間接冷却の場合は比較的事象が緩慢であるため、事故継続時間として短期 24 時間、長期 30 日間とした。検討条件を以下にまとめた。

ポット仕様	フィンなし 1 集合体ポット (径 300mm) フィン付 2 集合体ポット (径 500mm)
燃料破損目安	CDF=0.1 (St ベース)
事故継続時間 (短期)	24 時間
(長期)	30 日
初期下部ガスプレナム温度	395℃
初期下部ガスプレナム圧力	9.3MPa
周方向応力	12kgf/mm <sup>2</sup>

応力と破断時間の関係は以下の評価式より与えられる。時間係数については 3、S (MPa) は設計クリープ破断応力強さであり保守的に 0.8 分の 1 として (St ベース) 以下の式で評価される[4]。また、燃料取扱時はクリープ破断時間が 100 分の 1 になるとして評価した。

$$(T + 273.15)(35.12 + \log(100 \times \alpha \times t_R)) / 1000 = 56.784 - 9.133 \log S / 0.8$$

T : 温度 (℃)

$t_R$  : クリープ破断時間 (時間)

S : 周方向応力 (MPa)

$\alpha$  : 時間係数 (-)

### (3) ナトリウムポット間接冷却時のクリープ損傷評価

ナトリウムポット間接冷却時のクリープ損傷を表 5.1-1 にまとめる。また、発熱量とクリープ損傷の関係をフィンなし 1 集合体ポット (径 300mm) について図 5.1-1、フィン付 2

集合体ポット（径 500mm）について図 5.1-2 に示す。

短期事象（24 時間）では、1 集合体ポットでは集合体発熱量が 25kW のケースにおいて被覆管最高温度 643.1℃、CDF0.091 となり、2 集合体ポットでは集合体発熱量が 32kW のケースにおいて被覆管最高温度 642.8℃、CDF0.086 となる。このことから短期事象（24 時間）の被覆管制限温度目安として 630℃以下であれば CDF=0.1 を確保可能な見通しである。

長期事象（30 日）では、1 集合体ポットでは集合体発熱量が 22kW のケースにおいて被覆管最高温度 611.5℃、CDF0.071 となり、2 集合体ポットでは集合体発熱量が 28kW のケースにおいて被覆管最高温度 612.1℃、CDF0.072 となる。このことから長期事象（30 日）の被覆管制限温度目安として 600℃以下であれば CDF=0.1 を確保可能な見通しである。

#### (4) まとめ

ナトリウムポット間接冷却時の被覆管制限温度目安を過渡解析により評価した。クリープ損傷制限として CDF=0.1 とした場合は被覆管瀬現温度は短期事象（24 時間）、長期事象（30 日）それぞれ 630℃、600℃と評価された。

表 5. 1-1 集合体発熱量とクリープ損傷評価の関係

フィン無し径300mm		1体収納 LGP温度	応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	CFD(1日)	CFD(1月)
発熱量	最高温度				
15	527.2	367.4	11.5	3.54E-08	1.06E-06
20	590.4	410.5	12.28	1.76E-04	5.29E-03
21	600.9	418.7	12.43	6.56E-04	1.97E-02
22	611.5	427	12.58	0.002	0.071
23	622	435.3	12.72	0.008	0.246
24	632.6	443.6	12.87	0.028	0.833
25	643.1	451.8	13.02	0.091	2.733
30	687.7	487.6	13.66	10.43	312.77
35	726.8	514	14.14	431	12930

フィン付径500mm		2体収納 LGP温度	応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	CFD(1日)	CFD(1月)
発熱量	最高温度				
15	479.4	331.3	10.86	1.97E-11	5.91E-10
20	538.4	368.4	11.52	1.59E-07	4.77E-06
25	587.4	403.9	12.16	1.13E-04	3.40E-03
26	595.6	410.6	12.28	3.20E-04	9.61E-03
27	603.9	417.2	12.4	8.87E-04	2.66E-02
28	612.1	423.9	12.52	0.002	0.072
29	620.3	430.6	12.64	0.006	0.192
30	628.5	437.3	12.76	0.017	0.503
31	635.6	443.5	12.87	0.038	1.143
32	642.8	449.7	12.98	0.086	2.565
33	649.9	455.9	13.09	0.189	5.681
34	657	462	13.2	0.414	12.418
35	664.1	468.2	13.32	0.894	26.807

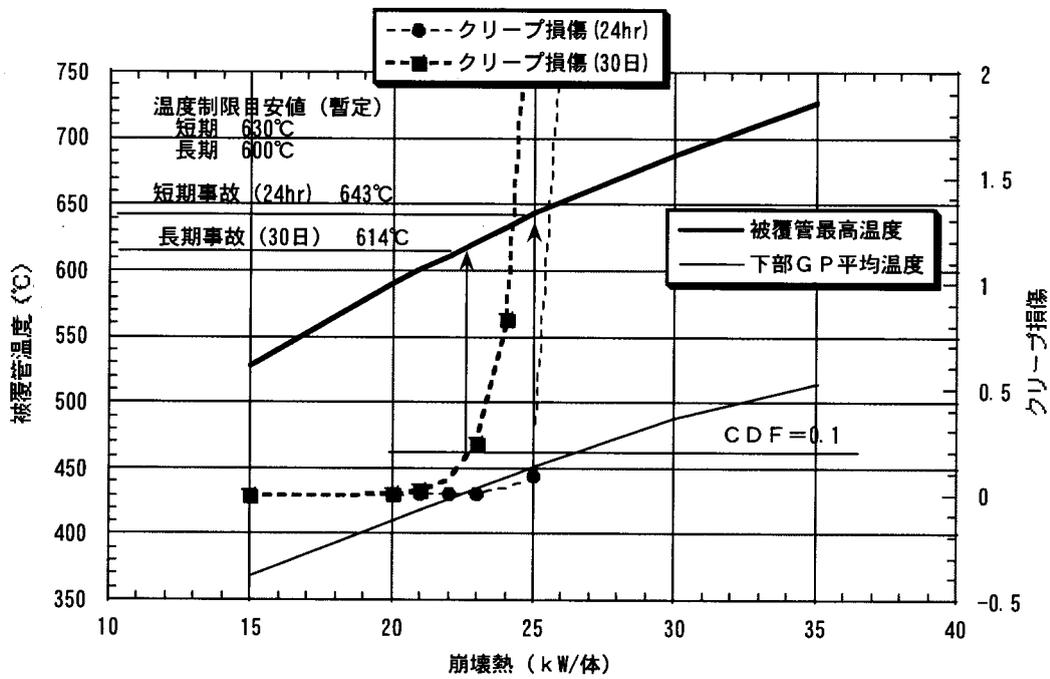


図 5.1-1 ナトリウムポット間接冷却時のクリープ損傷評価  
 (フィンなし1集合体ポット、径 300mm)

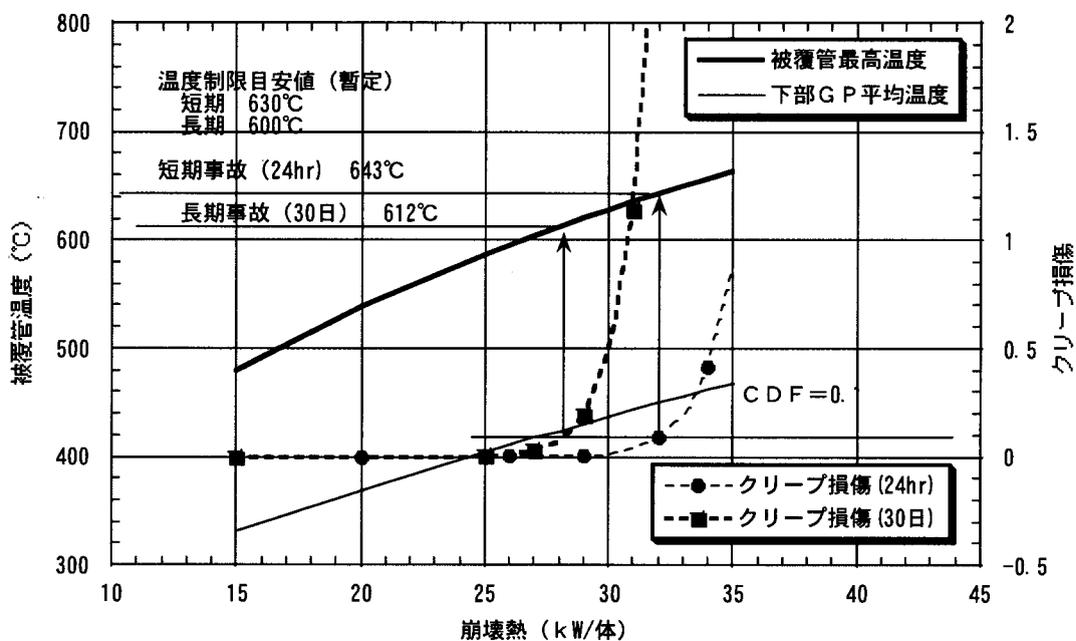


図 5.1-2 ナトリウムポット間接冷却時のクリープ損傷評価  
 (フィンあり 2 集合体ポット、径 500mm)

## 5.2 使用済燃料直接冷却喪失時の被覆管制限温度

使用済燃料直接冷却時は冷却系除熱喪失があった場合はナトリウムポット間接冷却の場合と比較して事象進展が急激であり、1時間以内に燃料破損に至るケースも多い。ここでは直接冷却時の被覆管制限温度目安を評価した。

使用済燃料直接冷却喪失時の被覆管温度とクリープ損傷の関係は 4.4 節において検討したためここではその結果を用いた。表 4.4-1 に示すとおり、直接冷却喪失時に CDF が 0.1 に達する時間は被覆管最高温度が 700℃に達する時間により保守的に表すことが可能である。このため使用済燃料直接冷却喪失等の 1 時間程度の事象における被覆管制限温度目安は 700℃とする。

### 5.3 破損燃料の被覆管制限温度

破損燃料の被覆管制限温度は現状では 450℃と暫定している。これは燃料破損の原因を照射後試験により評価するため燃料要素の状態を可能な限り保存する観点から設定している。燃料破損の原因としては破損位置近傍の被覆管硬度、被覆管の内面腐食、揮発性核分裂生成物の存在状態、被覆管の外形変化等の情報が重要である。破損燃料集合体の温度が大幅に上昇した場合は破損燃料の状態が変化して、破損原因解明のための情報が失われる可能性が大きい。この観点で被覆管制限温度 450℃としている。照射後試験による情報収集を無視して安全上の観点から被覆管制限温度を設定する場合は、大幅に合理化することが可能である。この場合、通常の使用済燃料集合体と同等の被覆管制限温度を使用することが可能であると考えられる。

## 6. おわりに

実用化戦略調査研究において検討中のナトリウム冷却大中型炉の燃料取扱設備について、EVST方式と水プール直接貯蔵方式が提案されている。ここでは燃料取扱設備における通常運転時および事故時の集合体の除熱評価を実施して燃料取扱設備への影響を検討した。

EVST方式と水プール直接貯蔵方式における燃料取扱時の事故事象を整理して抽出された事象に対して除熱評価を実施した。

使用済燃料ナトリウムポット間接冷却の除熱性評価では、3集合体ポットの場合はフィン付ポット径700mmで設計可能であることがわかった。2集合体ポットの場合はポット径はフィン付で500mm、フィンなしで600mmで制限条件を満たし、1集合体ポットの場合はフィン付、フィンなしともに300mmで制限条件を満たす可能性があることが明らかになった。

使用済燃料ナトリウムポット間接冷却一部喪失については3集合体ポットフィン付ポット径700mmとしても集合体発熱量24kW/体の条件では被覆管最高温度は687℃に達し、短期間の制限温度目安である630℃を大きく上回ることが明らかになった。このため移送系の多重化等によりナトリウムポットがドアバルブ位置で停止することを防止する設備対応が必要になると考えられる。

高発熱燃料を直接冷却した場合の冷却ガス流量および圧力損失の評価では集合体発熱量が22kWの場合は被覆管制限温度を200℃とすると冷却ガス流量12Nm<sup>3</sup>/min、圧力損失0.23MPaと大きくなり、冷却ガスが集合体内部に流れるように設備対応が必要であると考えられる。EVST方式の場合は減衰後の集合体発熱量を4kW程度とした場合は、冷却ガス流量は2.5Nm<sup>3</sup>/min、圧損は約0.01MPaにおいて被覆管制限温度を満たす設計が可能であると考えられ水プール直接貯蔵方式と比較して冷却系設備に課題はないと考えられる。

直接冷却除熱喪失については水プール直接貯蔵方式においては集合体発熱量は22kWと想定されるため、CDFが0.1に達するまでの時間余裕は被覆管初期温度が400℃のときに7分、186℃の時に12分であり短くアクシデントマネージメントは困難であると考えられる。移送系故障による直接冷却除熱喪失事象はBDDEだが移送系の多重化等の設備対応を行う必要があると考えられる。また、簡易評価の結果アクシデントマネージメントに少なくとも1時間は必要と考えると集合体の発熱量は4kW以下にする必要があることがわかった。

破損燃料を原子炉から早期に搬出することを想定した場合フィン付のポット径600mmの場合は集合体発熱量30kW、ポット径500mmの場合は集合体発熱量26kW以下とする必要があることがわかった。このため破損燃料の早期原子炉容器搬出は前提条件として通常燃料が複数移送用ポット使用およびフィン付ポットであることが条件となる。その場合でも集合体発熱量はポット径600mmで30kW、ポット径500mmで26kW以下とする必要があることがわかった。

燃料取扱時の被覆管制限温度目安はクリープ損傷制限としてCDF=0.1とした場合は被覆管制限温度は、直接冷却時（1時間程度）、間接冷却短期事象（24時間）、間接冷却長期事

象（30日）それぞれ700℃、630℃、600℃と評価された。また、破損燃料は照射後試験時に破損原因調査等を実施する観点から暫定的に450℃とした。

参考文献

- [1] 三原隆嗣ら：「FBR システム技術検討書－平成 12 年度技術検討書－」、JNC TY9400 2001-012、(2001)
- [2] 西村元彦、前川勇、"Development of a multi-dimensional Thermal-hydraulic Analysis Code and Its Application to the Products"、川崎重工技報、115 号、(1992)
- [3] K.Kobayashi, R.Tanaka and H.Yoshida, "Thermo-hydraulics-Neutronics Code Mr. X for Gas-Cooled Fast Breeder Reactors", Proc. of GCFR Specialist Meeting in Brussels, (1979)
- [4] 水田俊治、上平明弘、鶴飼重治：「ODS フェライト鋼被覆管の設計評価用関係式の検討」、TN9400 2000-048、(2000)

**謝辞**

本報告書をまとめるにあたり広範な調査をしていただいた富士電機システムズの戸澤克弘殿、南了悟殿、川崎重工株式会社の赤津実殿に感謝します。