

分置

ナトリウム冷却炉の燃料取扱設備の検討
—平成15年度の研究成果のまとめ—
(研 究 報 告)

2005年7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)

2005

ナトリウム冷却炉の燃料取扱設備の検討
－平成 15 年度の研究成果のまとめ－

(研究報告)

近澤佳隆*1、堀徹*2、臼井伸一*1、此村守*1、西口洋平*3

要旨

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究の一環としてナトリウム冷却炉の燃料取扱設備の検討を実施している。平成 15 年度はナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントにおける燃料取扱設備として EVST 方式の全体システムを具体化して課題の整理を行った。燃料交換機としてはマニプレータ式を採用し、耐震評価から UIS との干渉回避が可能である見通しを得た。炉内から EVST への輸送方式としては複数体移送方式を採用し燃料交換時間の短縮が可能であることを示した。また、燃料取扱設備の大幅合理化を目的として水プール直接貯蔵方式についても検討を行った。水プール直接貯蔵方式は貯蔵設備を大幅に削減可能だが移送系設備が増加するため EVST と比較して大幅な物量削減は期待できないことが明らかになり、さらに物量を削減した構成を追求する必要があると考えられる。

*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)

*3 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 (日本原子力発電株式会社からの派遣者、現：東芝)

本研究は、「高速増殖炉システムの実用化調査研究に関する協力協定」に基づき実施した JNC と原電 (9 電力会社、電源開発株式会社及び原電の代表) との共有成果である。

Design Study on a Fuel Handling System
in a Sodium Cooled Reactor

(Research Document)

Yoshitaka Chikazawa*¹, Toru Hori*², Shinichi Usui*¹,
Mamoru Konomura*¹, Youhei Nishiguchi*³

Abstract

In the feasibility study on commercialized fast breeder cycle system, fuel handling systems for sodium cooled reactors has been studied. In FY 2003 study, a fuel handling system with an EVST for a power plant with 4 medium scale modular reactors is designed and key issues about the system are identified. A manipulator type fuel handling machine suitable for the upper internal structure with a slit designed and seismic analyses show that it can treat spent fuels without interaction with upper internal structure in earthquakes. Fuel handling time is reduced adopting a sodium pot which can carry 2 subassemblies in onetime.

In this study, a innovative concept without an EVST is also studied. In this concept, the total mass is not dramatically reduced comparing a system with an EVST because several fuel transfer machines with gas cooling systems are needed for safety point of view.

-
- 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)
 - 3) FBR System Engineering Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC (attached from Japan Atomic Power Company, present: Toshiba Corporation)

This report is the outcome of collaborative study between JNC and JAPC (that is the representative of 9 electric utilities, Electric Power Development Company and JAPC) in the accordance with "The agreement about the development of a commercialized Fast Breeder Reactor Cycle System".

目次

1. はじめに	1
2. 検討経緯および条件	2
2.1 検討経緯	2
2.2 検討条件	10
3. 中型モジュールプラントの燃料取扱設備の検討	24
3.1 燃料交換機	24
3.1.1 構造概念検討	24
3.1.2 耐震性評価	31
3.1.3 ユニバーサルジョイント寿命評価	36
3.2 炉内中継装置	41
3.2.1 構造概念検討	41
3.2.2 耐震性評価	51
3.2.3 配置整合性評価	58
3.2.4 移送方式比較評価	61
3.3 燃料出入機	73
3.3.1 構造概念検討	73
3.3.2 耐震性評価	83
3.3.3 冷却系検討	93
3.4 炉外燃料貯蔵設備	113
3.4.1 貯蔵容量検討	113
3.4.2 臨界ピッチ評価	116
3.4.3 構造概念検討	124
3.4.4 冷却系検討	132
3.4.5 炉心退避検討	144
3.5 燃料洗浄設備	147
3.6 燃料昇降装置	157
3.7 使用済燃料	166
3.7.1 貯蔵容量検討	166
3.7.2 臨界ピッチ評価	168
3.7.3 構造概念検討	173
3.7.4 冷却系検討	177
3.8 全体システム	196
4. 水プール直接貯蔵方式の検討	202
4.1 全体システム	202
4.2 冷却系影響評価	215

4.3 電源系影響評価	234
4.4 燃料取扱方式の比較評価	247
5. おわりに	253
参考文献	254
謝辞	255
付録1 燃料出入機固有値評価	付-1 (1)
付録2 乾式洗浄試験	付-2 (1)

表リスト

表 2.1-1	燃料取扱設備検討条件 (平成 13 年度)	・・・4
表 2.1-2	燃料取扱設備検討条件 (平成 14 年度)	・・・5
表 2.1-3	燃料交換機の比較評価	・・・6
表 2.1-4	燃料洗浄方式の比較評価	・・・7
表 2.1-5	燃料洗浄方式物量による廃液発生量の比較評価	・・・8
表 2.1-6	燃料取扱方式の比較評価	・・・9
表 2.2-1	ナトリウム冷却中型炉の主要仕様	・・・11
表 2.2-2	平成 15 年度 燃料取扱設備の検討条件	・・・12
表 2.2-3	燃料発熱量に係る検討条件	・・・13
表 2.2-4	燃料要素部の熱容量	・・・14
表 2.2-5 (1/2)	燃料取扱設備の安全設計方針	・・・15
表 2.2-5 (2/2)	燃料取扱設備の安全設計方針	・・・16
表 3.1.1-1	マニプレータ式燃料交換機主要仕様	・・・26
表 3.1.2-1	マニプレータ式燃料交換機アーム変位の解析検討	・・・33
表 3.1.3-1	マニプレータ式燃料交換機の運転条件	・・・38
表 3.2.1-1	炉内中継槽基本仕様	・・・44
表 3.2.4-1	複数体移送の有無による物量比較	・・・65
表 3.2.4-2	複数体移送の有無によるコスト比較	・・・66
表 3.2.4-3 (1/2)	移送方式による燃料交換時間比較 (ケース 1)	・・・67
表 3.2.4-3 (2/2)	移送方式による燃料交換時間比較 (ケース 2)	・・・68
表 3.2.4-4	炉内中継装置の比較評価 (複数体移送の採用)	・・・69
表 3.3.3-1	燃料出入機間接冷却系の検討条件 (平成 14 年度条件)	・・・96
表 3.3.3-2	燃料出入機間接冷却系の集合体圧力損失計算式	・・・97
表 3.3.3-3	燃料出入機間接冷却系のブロワ昇温計算式	・・・98
表 3.3.3-4	燃料出入機間接冷却系の圧力損失内訳	・・・99
表 3.3.3-5	燃料出入機直接冷却系の検討条件 (平成 14 年度条件)	・・・100
表 3.3.3-6	燃料出入機直接冷却系の集合体圧力損失計算式	・・・101
表 3.3.3-7	燃料出入機直接冷却系の無駄流れ圧力損失計算式	・・・102
表 3.3.3-8	燃料出入機直接冷却系の集合体熱伝達計算式	・・・103
表 3.4.1-1	EVST 貯蔵容量と経済性および炉心退避期間の関係	・・・115
表 3.4.2-1	EVST 臨界ピッチ計算条件	・・・118
表 3.4.3-1	EVST 中燃料の貯蔵ピッチ評価	・・・126
表 3.4.3-2	案内管有無による段違い積貯蔵方式の比較	・・・127
表 3.4.3-3	EVST 遮へいプラグ方式に係る検討結果	・・・128
表 3.4.4-1	EVST 冷却系の安全要求対応	・・・134

表 3.4.4-2	EVST 冷却系の基本仕様	・・・	135
表 3.4.4-3	EVST 冷却系のナトリウム循環ポンプ仕様	・・・	135
表 3.4.4-4	EVST 冷却系の空気冷却器仕様	・・・	135
表 3.4.4-5	EVST 冷却系の送風機仕様	・・・	135
表 3.4.4-6	EVST におけるナトリウム漏えい対策	・・・	136
表 3.4.5-1	早期炉心退避に対応した燃料出入機仕様変更	・・・	145
表 3.4.5-2	早期炉心退避対応による影響検討	・・・	146
表 3.5-1	乾式洗浄装置検討条件	・・・	149
表 3.5-2	乾式洗浄時の集合体圧力損失計算式	・・・	150
表 3.5-3	乾式洗浄時の無駄流れ圧力損失計算式	・・・	151
表 3.5-4	乾式洗浄時の集合体熱伝達計算式	・・・	152
表 3.5-5	乾式洗浄時のブロワ昇温計算式	・・・	153
表 3.7.2-1	使用済燃料プール臨界ピッチ計算条件	・・・	170
表 3.7.4-1 (1/4)	使用済燃料プール運用 (EVST 取出時 4kW/体)	・・・	179
表 3.7.4-1 (2/4)	使用済燃料プール運用 (EVST 取出時 4kW/体)	・・・	180
表 3.7.4-1 (3/4)	使用済燃料プール運用 (EVST 取出時 4kW/体)	・・・	181
表 3.7.4-1 (4/4)	使用済燃料プール運用 (EVST 取出時 4kW/体)	・・・	182
表 3.7.4-2 (1/4)	使用済燃料プール運用 (EVST 取出時 5kW/体)	・・・	183
表 3.7.4-2 (2/4)	使用済燃料プール運用 (EVST 取出時 5kW/体)	・・・	184
表 3.7.4-2 (3/4)	使用済燃料プール運用 (EVST 取出時 5kW/体)	・・・	185
表 3.7.4-2 (4/4)	使用済燃料プール運用 (EVST 取出時 5kW/体)	・・・	186
表 3.7.4-3 (1/2)	使用済燃料プール運用 (炉心退避)	・・・	187
表 3.7.4-3 (2/2)	使用済燃料プール運用 (炉心退避)	・・・	188
表 3.7.4-4	使用済燃料プール冷却系循環ポンプ仕様	・・・	189
表 3.7.4-5	使用済燃料プール冷却系熱交換器仕様	・・・	189
表 3.7.4-6	使用済燃料プール浄化系仕様	・・・	190
表 3.8-1	燃料取扱設備の主要仕様	・・・	198
表 3.8-2	燃料交換時間評価	・・・	199
表 4.1-1	水プール直接貯蔵方式による燃料取扱設備主要仕様	・・・	205
表 4.1-2	使用済燃料のピーク線出力	・・・	206
表 4.1-3	使用済燃料の単位長さ熱容量	・・・	207
表 4.1-4	使用済燃料の温度上昇率	・・・	208
表 4.1-5	冷却機能喪失時におけるガス中裸燃料の余裕時間	・・・	209
表 4.1-6	水プール直接貯蔵方式における燃料交換時間検討条件	・・・	210
表 4.1-7	燃料洗浄後における必要な冷却時間	・・・	211
表 4.2-1	水プール直接貯蔵における冷却ガス必要流量	・・・	218
表 4.3-1	回転移送機冷却系の圧縮機電源容量評価 (冷却ガス温度 50℃)	・・・	237

表 4.3-2	回転移送機冷却系の圧縮機電源容量評価 (冷却ガス温度 150℃)	・・・238
表 4.3-3	乾式洗浄設備の圧縮機電源容量評価	・・・239
表 4.3-4	燃料取扱設備冷却系の運転モード	・・・240
表 4.3-5	無停電電源設備負荷容量	・・・241
表 4.3-6	無停電電源設備仕様	・・・242
表 4.3-7	各燃料貯蔵方式の電源容量	・・・243
表 4.4-1	各燃料貯蔵方式の物量比較	・・・250
表 4.4-2	各燃料貯蔵方式のコスト比較	・・・251
表 4.4-3	各燃料貯蔵方式の比較評価	・・・252
付表 2.3.1-1	初期ナトリウム付着試験結果のまとめ	・・・付-2 (9)
付表 2.3.2-1	高温アルゴンガス洗浄試験結果のまとめ	・・・付-2 (12)
付表 2.3.3-1	中温アルゴンガス洗浄試験結果のまとめ	・・・付-2 (23)
付表 2.3.4-1	水浸漬時影響評価試験結果 (高温洗浄後)	・・・付-2 (38)
付表 2.3.4-2	水浸漬時影響評価試験結果 (中温洗浄後)	・・・付-2 (38)

図リスト

図 2.2-1	ナトリウム冷却中型炉の燃料集合体概念図[1]	・・・ 17
図 2.2-2	ナトリウム冷却中型炉の炉心配置図（平衡期）[1]	・・・ 18
図 2.2-3	ナトリウム冷却中型炉の原子炉容器構造概念図[1]	・・・ 19
図 2.2-4	ナトリウム冷却中型炉の原子炉構造断面図[1]	・・・ 20
図 2.2-5	ナトリウム冷却中型炉の系統構成図[1]	・・・ 21
図 2.2-6	ナトリウム冷却中型炉の建屋配置平面図[1]	・・・ 22
図 2.2-7	ナトリウム冷却中型炉の建屋配置立面図[1]	・・・ 23
図 3.1.1-1	マニプレータ式燃料交換機構造概念図	・・・ 27
図 3.1.1-2	マニプレータ式燃料交換機構造概念図（グリッパユニット廻り）	・・・ 28
図 3.1.1-3	マニプレータ式燃料交換機駆動原理図	・・・ 29
図 3.1.1-4	アーム軸受け及びユニバーサルジョイントのナトリウム浸漬対応	・・・ 30
図 3.1.2-1	燃料交換機耐震性評価解析条件（床応答曲線）	・・・ 34
図 3.1.2-2	燃料交換機耐震性評価解析条件（解析モデル）	・・・ 35
図 3.1.3-1	炉内輸送経路（回転ラック式）	・・・ 39
図 3.1.3-2	炉内輸送経路（固定ラック式）	・・・ 40
図 3.2.1-1	複数体ポット概念図	・・・ 45
図 3.2.1-2 (1/2)	固定ラック式炉内中継装置概念図	・・・ 46
図 3.2.1-2 (2/2)	固定ラック式炉内中継装置概念図	・・・ 47
図 3.2.1-3	炉内中継装置案内管間接冷却系系統図	・・・ 48
図 3.2.1-4	炉内中継装置案内管切欠き部概念図（平面図）	・・・ 49
図 3.2.1-5	炉内中継装置案内管切欠き部概念図（立面図）	・・・ 50
図 3.2.2-1	炉内案内管耐震性評価（計算体系）	・・・ 55
図 3.2.2-2	炉内案内管耐震性評価（単純梁モデル）	・・・ 56
図 3.2.2-3	炉内案内管耐震性評価（床応答曲線）	・・・ 57
図 3.2.3-1	炉内中継装置支持構造物を切欠いた場合の遮へい検討	・・・ 60
図 3.2.4-1	ナトリウム冷却中型炉の定期点検工程（標準）	・・・ 70
図 3.2.4-2	ナトリウム冷却中型炉の定期点検工程（標準外）	・・・ 71
図 3.2.4-3	複数体移送の有無による稼働率の評価結果	・・・ 72
図 3.3.1-1	燃料出入機構造概念図	・・・ 75
図 3.3.1-2	マイクロドーリ概念図	・・・ 76
図 3.3.1-3	マイクロドーリ配置図	・・・ 77
図 3.3.1-4	燃料出入機位置決め方法概念図	・・・ 78
図 3.3.1-5	燃料出入機グリッパ構造概念図	・・・ 79
図 3.3.1-6	燃料出入機付け替えグリッパ概念図	・・・ 80
図 3.3.1-7	燃料出入機ケーブル巻取り方式概念図	・・・ 81

図 3.3.1-8	燃料出入機ケーブル巻取り機概念図	・・・82
図 3.3.2-1	燃料出入機転倒条件の計算体系	・・・86
図 3.3.2-2	燃料出入機耐震性評価用の床応答曲線（水平方向）	・・・87
図 3.3.2-3	燃料出入機幅と上下方向加速度の関係	・・・88
図 3.3.2-4	燃料出入機耐震性評価用の床応答曲線（上下方向）	・・・89
図 3.3.2-5	ダンパ寸法設定根拠	・・・90
図 3.3.2-6	燃料出入機ロック防止概念図	・・・91
図 3.3.2-7	燃料出入機サスペンション構造概念図	・・・92
図 3.3.3-1	移送系故障時の燃料出入機による間接冷却概念図	・・・104
図 3.3.3-2	燃料出入機直接冷却時の被覆管最高温度（移送時）	・・・105
図 3.3.3-3	燃料出入機直接冷却時の被覆管温度分布（移送時）	・・・106
図 3.3.3-4	燃料出入機直接冷却時の流量評価（移送時、単体移送）	・・・107
図 3.3.3-5	燃料出入機直接冷却時の流量評価（移送時、複数体移送）	・・・108
図 3.3.3-6	燃料出入機直接冷却時のヒートマスバランス（移送時、単体移送）	・・・109
図 3.3.3-7	燃料出入機直接冷却時のヒートマスバランス（移送時、複数体移送）	・・・110
図 3.3.3-8	燃料出入機の直接冷却系統図（移送時）	・・・111
図 3.3.3-9	燃料出入機の直接冷却ヒートマスバランス（移送時、最終仕様）	・・・112
図 3.4.2-1	臨界計算体系（EVST、2 段積段違い貯蔵）	・・・119
図 3.4.2-2	臨界計算体系（EVST、1 段積貯蔵）	・・・120
図 3.4.2-3	臨界計算結果（EVST、2 段積段違い貯蔵）	・・・121
図 3.4.2-4	臨界計算結果（EVST、1 段積貯蔵）	・・・122
図 3.4.2-5	軸方向ピッチの影響評価（案内管なし）	・・・123
図 3.4.3-1	EVST 構造概念図	・・・129
図 3.4.3-2	EVST 槽内移送機構概念図	・・・130
図 3.4.3-3	EVST 槽内移送機バウンダリ構成図	・・・131
図 3.4.4-1 (1/2)	EVST 所熱容量の検討（4kW/体取出）	・・・137
図 3.4.4-1 (2/2)	EVST 所熱容量の検討（5kW/体取出）	・・・138
図 3.4.4-2	EVST 冷却系系統構成図	・・・139
図 3.4.4-3	空気冷却器構造概念図	・・・140
図 3.4.4-4	EVST 冷却系ヒートマスバランス図（通常時）	・・・141
図 3.4.4-5	EVST 冷却系ヒートマスバランス図（事故時）	・・・142
図 3.4.4-6	EVST 冷却系ヒートマスバランス図（自然循環時）	・・・143
図 3.5-1	乾式洗浄時の系統構成図	・・・154
図 3.5-2	乾式洗浄時の集合体温度分布	・・・155
図 3.5-3	乾式洗浄時のヒートマスバランス図	・・・156
図 3.6-1	燃料昇降装置概念図	・・・160
図 3.6-2	燃料昇降装置冷却系概念図	・・・161

図 3.6-3	燃料昇降機能を有する水中台車概念図	・・・	162
図 3.6-4 (1/3)	燃料昇降機能を有する水中台車作業手順	・・・	163
図 3.6-4 (2/3)	燃料昇降機能を有する水中台車作業手順	・・・	164
図 3.6-4 (3/3)	燃料昇降機能を有する水中台車作業手順	・・・	165
図 3.7.2-1	臨界計算体系 (使用済燃料プール)	・・・	171
図 3.7.2-2	臨界計算結果 (使用済燃料プール)	・・・	172
図 3.7.3-1	使用済燃料貯蔵ラック概念図	・・・	175
図 3.7.3-2	使用済燃料貯蔵プール概念図	・・・	176
図 3.7.4-1	使用済燃料プール除熱量評価 (EVST 取出時 4kW/体)	・・・	191
図 3.7.4-2	使用済燃料プール除熱量評価 (EVST 取出時 5kW/体)	・・・	192
図 3.7.4-3	使用済燃料プール除熱量評価 (炉心退避時)	・・・	193
図 3.7.4-4	使用済燃料プール冷却系系統図	・・・	194
図 3.7.4-5	使用済燃料プール冷却系ヒートマスバランス図	・・・	195
図 3.8-1	燃料取扱設備全体システム概念図	・・・	200
図 3.8-2	EVST 貯蔵方式における運用スケジュール (4 バッチ連続燃料交換のケース)	・・・	201
図 4.1-1	水プール直接貯蔵方式の全体構成概念図	・・・	212
図 4.1-2	水プール直接貯蔵方式の安全対応	・・・	213
図 4.1-3	水プール直接貯蔵方式の燃料交換スケジュール	・・・	214
図 4.2-1	水プール直接貯蔵方式全体システム概念図 (平成 14 年度)	・・・	219
図 4.2-2	集合体軸方向発熱分布 (平成 14 年度)	・・・	220
図 4.2-3	水プール直接貯蔵方式の燃料軸方向温度分布 (冷却ガス温度 50℃)	・・・	221
図 4.2-4	水プール直接貯蔵方式の燃料軸方向温度分布 (冷却ガス温度 150℃)	・・・	222
図 4.2-5	水プール直接貯蔵方式の被覆管最高温度と冷却ガス流量の関係	・・・	223
図 4.2-6	回転移送機冷却系系統図	・・・	224
図 4.2-7	フレキシブルチューブによる回転移送機概念図	・・・	225
図 4.2-8 (1/2)	回転移送機グリッパ概念図	・・・	226
図 4.2-8 (2/2)	回転移送機グリッパ概念図 (冷却時)	・・・	227
図 4.2-9	フレキシブルチューブ径と冷却ガス流速の関係	・・・	228
図 4.2-10	フレキシブルチューブの巻取り径と長さの関係	・・・	229
図 4.2-11	多段ノズル方式の回転移送機概念図	・・・	230
図 4.2-12	水プール直接貯蔵方式の乾式洗浄冷却系系統図	・・・	231
図 4.2-13	案内管方式による乾式洗浄	・・・	232
図 4.2-14	案内管方式の場合の冷却ガス無駄流れ評価	・・・	233
図 4.3-1	燃料取扱系無停電電源の単線結線図	・・・	244
図 4.3-2	交流無停電電源装置外観図	・・・	245
図 4.3-3	架台式蓄電池外観図	・・・	246

付図 1-1	燃料出入機固有値解析 (解析対象)	・ ・ 付-1 (2)
付図 1-2	燃料出入機固有値解析 (計算体系寸法)	・ ・ 付-1 (3)
付図 1-3	燃料出入機固有値解析 (計算体系重量)	・ ・ 付-1 (4)
付図 1-4	燃料出入機固有値解析 (水平方向床応答曲線)	・ ・ 付-1 (5)
付図 1-5	燃料出入機固有値解析 (上下方向床応答曲線)	・ ・ 付-1 (5)
付図 1-6	燃料出入機固有値解析 (1次モード解析結果 3.87Hz)	・ ・ 付-1 (6)
付図 1-7	燃料出入機固有値解析 (2次モード解析結果 5.78Hz)	・ ・ 付-1 (7)
付図 1-8	燃料出入機固有値解析 (3次モード解析結果 11.9Hz)	・ ・ 付-1 (8)
付図 2.2-1	乾式洗浄試験の試験装置全体図	・ ・ 付-2 (2)
付図 2.2-2	乾式洗浄試験の模擬集合体	・ ・ 付-2 (3)
付図 2.2-3	乾式洗浄試験の模擬集合体温度計測位置	・ ・ 付-2 (4)
付図 2.2-4	乾式洗浄試験のナトリウム浸漬容器	・ ・ 付-2 (5)
付図 2.2-5	乾式洗浄試験のアルゴンガス洗浄槽	・ ・ 付-2 (6)
付図 2.2-6	乾式洗浄試験のアルゴンガス循環系	・ ・ 付-2 (7)
付図 2.3.1-1	初期ナトリウム付着量確認試験のナトリウム付着状況	・ ・ 付-2 (10)
付図 2.3.2-1	高温洗浄試験の温度履歴 (ケース 1)	・ ・ 付-2 (13)
付図 2.3.2-2	高温洗浄試験の温度履歴 (ケース 2)	・ ・ 付-2 (14)
付図 2.3.2-3	高温洗浄試験の温度履歴 (ケース 3)	・ ・ 付-2 (15)
付図 2.3.2-4	高温洗浄試験の温度履歴 (ケース 4)	・ ・ 付-2 (16)
付図 2.3.2-5	高温洗浄試験の温度履歴 (ケース 5)	・ ・ 付-2 (17)
付図 2.3.2-6	高温洗浄試験の温度履歴 (ケース 6)	・ ・ 付-2 (18)
付図 2.3.2-7 (1/3)	高温洗浄試験のナトリウム付着状況 (ケース 1)	・ ・ 付-2 (19)
付図 2.3.2-7 (2/3)	高温洗浄試験のナトリウム付着状況 (ケース 1)	・ ・ 付-2 (20)
付図 2.3.2-7 (3/3)	高温洗浄試験のナトリウム付着状況 (ケース 1)	・ ・ 付-2 (21)
付図 2.3.3-1	中温洗浄試験の温度履歴 (ケース 1)	・ ・ 付-2 (24)
付図 2.3.3-2	中温洗浄試験の温度履歴 (ケース 2)	・ ・ 付-2 (25)
付図 2.3.3-3	中温洗浄試験の温度履歴 (ケース 3)	・ ・ 付-2 (26)
付図 2.3.3-4	中温洗浄試験の温度履歴 (ケース 4)	・ ・ 付-2 (27)
付図 2.3.3-5	中温洗浄試験の温度履歴 (ケース 5)	・ ・ 付-2 (28)
付図 2.3.3-6	中温洗浄試験の温度履歴 (ケース 6)	・ ・ 付-2 (29)
付図 2.3.3-7	中温洗浄試験の温度履歴 (ケース 7)	・ ・ 付-2 (30)
付図 2.3.3-8	中温洗浄試験の温度履歴 (ケース 8)	・ ・ 付-2 (31)
付図 2.3.3-9	中温洗浄試験の温度履歴 (ケース 9)	・ ・ 付-2 (32)
付図 2.3.3-10 (1/4)	中温洗浄試験のナトリウム付着状況 (ケース 1)	・ ・ 付-2 (33)
付図 2.3.3-10 (2/4)	中温洗浄試験のナトリウム付着状況 (ケース 1)	・ ・ 付-2 (34)
付図 2.3.3-10 (3/4)	中温洗浄試験のナトリウム付着状況 (ケース 1)	・ ・ 付-2 (35)
付図 2.3.3-10 (4/4)	中温洗浄試験のナトリウム付着状況 (ケース 1)	・ ・ 付-2 (36)

付図 2.3.4-1	水浸漬時影響試験の圧力計測位置	・・付-2 (39)
付図 2.3.4-2	水浸漬時影響試験の圧力測定値 (高温洗浄ケース 2)	・・付-2 (40)
付図 2.3.4-3	水浸漬時影響試験の圧力測定値 (高温洗浄ケース 3)	・・付-2 (41)
付図 2.3.4-4	水浸漬時影響試験の圧力測定値 (高温洗浄ケース 4)	・・付-2 (42)
付図 2.3.4-5	水浸漬時影響試験の圧力測定値 (高温洗浄ケース 5)	・・付-2 (43)
付図 2.3.4-6	水浸漬時影響試験の圧力測定値 (高温洗浄ケース 6)	・・付-2 (44)
付図 2.3.4-7	水浸漬時影響試験の圧力測定値 (中温洗浄ケース 2)	・・付-2 (45)
付図 2.3.4-8	水浸漬時影響試験の圧力測定値 (中温洗浄ケース 3)	・・付-2 (46)
付図 2.3.4-9	水浸漬時影響試験の圧力測定値 (中温洗浄ケース 4)	・・付-2 (47)
付図 2.3.4-10	水浸漬時影響試験の圧力測定値 (中温洗浄ケース 5)	・・付-2 (48)
付図 2.3.4-11	水浸漬時影響試験の圧力測定値 (中温洗浄ケース 6)	・・付-2 (49)
付図 2.3.4-12	水浸漬時影響試験の圧力測定値 (中温洗浄ケース 7)	・・付-2 (50)
付図 2.3.4-13	水浸漬時影響試験の圧力測定値 (中温洗浄ケース 8)	・・付-2 (51)

1. はじめに

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究ではナトリウム冷却炉として大型炉および中型モジュール炉が検討されている。本報告書は平成 15 年度に実施されたナトリウム冷却中型モジュール炉における燃料取扱設備の検討をまとめたものである。

2. 検討経緯および条件

2.1 検討経緯

平成 13 年度、平成 14 年度における燃料取扱設備の検討条件を表 2.1-1、表 2.2-2 に示す。以下では各設備について従来の検討経緯をまとめた。平成 15 年度は実用化戦略調査研究で検討中のナトリウム冷却中型炉（75 万 kWe×4 モジュールプラント）[1]を対象として燃料取扱設備の検討を実施した。

(1) 燃料交換機

平成 13 から 14 年度において切込み付炉上部機構に対応した燃料交換機としてパンタグラフ式およびマニプレータ式燃料交換機の比較評価を行なった。評価結果を表 2.1-1 にまとめる。コストは同程度であり、耐震性など成立性評価上に有意な差は無いがマニプレータ式燃料交換機の方が物量および技術課題の点でパンタグラフ式燃料交換機よりも若干優位となることが明らかになった。また、マニプレータ式燃料交換機については、従来から位置決め精度、ユニバーサルジョイント寿命評価等の試験[2-4]を実施しているため、本年度はマニプレータ式燃料交換機を対象としてナトリウム冷却中型炉に適合した構造を具体化し、耐震性およびユニバーサルジョイント寿命の評価を行うこととした。

(2) 炉内中継装置

平成 13 から 14 年度において固定ラック式と回転ラック式で比較評価を行った。複数体移送の採用の有無により、選定すべき型式が異なり、単体移送では高速増殖原型炉で実績のある回転ラック式、複数体移送では固定ラック式が適合する。固定ラック式では複数体移送を前提とすれば稼働率向上が可能であり経済性が優れる。平成 13 年度においては複数体移送の場合におけるナトリウムポットの除熱性評価を実施した[5]。本年度は除熱評価結果をもとにフィン付ナトリウムポットによる 2 体移送を前提として固定ラック式の炉内中継槽の概念検討を行い、複数体移送の採用の有無を判断することとした。

(3) 燃料出入機

ナトリウム冷却中型炉は 4 モジュールプラント（平成 13 年度は 6 モジュールプラント）を採用している。従来の概念として高速増殖原型炉で実績のある軌道付き走行台車は一直線の移動のみしか想定していないため、平面に配置された 4 基の原子炉容器と炉外燃料貯蔵設備の間を移動する自由度の高い走行を行う新しい燃料出入機の検討を行った。平成 13 から 14 年度にかけて軌道付き燃料出入機をターンテーブルにより方向転換する方式、曲線軌道方式、切替走行方式、レールレス方式の燃料出入機の比較評価を行ったが、物量低減効果が最も大きいと考えられるレールレス方式を検討対象として選定した。本年度はレールレス方式の燃料交換機を具体化し転倒防止および冷却系の検討を行うこととした。

(4) 燃料洗浄設備

平成 13 年度において燃料洗浄設備の比較評価を行った。洗浄方式と廃棄物量の比較評価を表 2.1-4、表 2.1-5 に示す。湿式洗浄と比較して洗浄性能は低下するが物量および廃棄物低減の可能性の大きい乾式洗浄設備を対象として設備の具体化を行うこととした。乾式洗浄を採用する場合、EVST の床循環系と燃料出入機の冷却系を接続することにより専用の燃料洗浄設備を用いなくて燃料洗浄を行うことも可能であるため、物量削減の観点から専用の燃料洗浄装置を削除した燃料洗浄方式の具体化を行った。

(5) 燃料貯蔵方式

平成 13 から 14 年度にかけて EVST 方式および水プール直接貯蔵方式の比較を実施した。平成 14 年度における物量比較評価を表 2.1-6 に示す。水プール直接貯蔵方式は EVST を削除可能という利点があるが移送系および冷却系物量が増加して経済性合理化効果が少ないことが明らかになった。このため平成 15 年度はレファレンスとして EVST 方式を採用し、水プール直接貯蔵方式については合理化を検討し、EVST 方式と最終的な比較評価を行うこととした。

表 2.1-1 燃料取扱設備検討条件(平成13年度)

項目	単位	H13・大型炉条件	H13・中型炉条件	備考		
1.プラント基本条件						
(1)基本型式		ツインプラント	6基構成のモジュールプラント			
(2)熱出力	MWt/基	3570	1190			
(3)炉型式	型式	ルーブ型炉	同左			
(5)原子炉建屋構造	型式	免震・ツインプラント方式	免震・モジュール方式(共通のベースマット)			
(6)原子炉構造	型式	下部支持・上部流入方式	同左			
	原子炉容器	内径	mm	9600	7060	
	炉上部機構	基本方式	mm	切込み付きコラム型	同左	
		切込み幅 ¹⁾	mm	バップル板部:385 H/P部:345 (430.1)	バップル板部:345 H/P部:325 (366.7)	
		DP位置	m	炉心頂部 +5.9 NsL -1.4	炉心頂部 +5.95 NsL -1.25	
	回転プラグ	ルーベック貫通孔径	mm	5840	4100	
		ヘアリング部外径	mm	6510	4770	
		RVとの偏心量	mm	310	505	
	炉内燃料受渡位置(炉心中心より)	mm	3635	2550	燃料交換機との取合位置	
	炉外燃料受渡位置(炉心中心より)	mm	4315	3210	燃料出入機との取合位置	
(7)プラント運転サイクル	月	18	同左			
(8)プラント寿命	年	60	同左			
(9)定検期間	日	38	31	標準定検		
(10)炉心構成及び炉心配置	型式	-	2領域均質炉心	同左		
	炉心構成(本数)	内側炉心燃料	本	316	114	
		外側炉心燃料	本	278	114	
		径方向ブランケット	本	96	126	
		主炉停止棒	本	40	16	
		後備炉停止棒	本	15	9	
		しゃへい体	本	324	150	
(11)燃料交換計画	バッチ数	炉心燃料	バッチ数	4	同左	
		径方向ブランケット	バッチ数	4	同左	
		制御棒	バッチ数	1	同左	
(12)地震条件		-	二次元免震(M6.5)	大型炉と同じと仮定	上下5Hzの免震要素を使用する計画も、上下耐震の床応答曲線を使用	
2.燃料集合体仕様	型式	-	MOX、ダクト付き	同左		
	全長	mm	4370	4600		
	炉心高さ	mm	800	900		
	ラッパ管外対面距離	mm	177.9	160.5		
	燃料ピン数	本	271	217		
	燃料被覆管径	mm	8.6	8.5		
	燃料被覆管材質	-	ODS	同左		
	燃料ピン配列ピッチ	mm	10.04	10.0		
	スぺーサワイヤ径	mm	1.39	1.48		
	スぺーサワイヤ巻付ピッチ	mm	200	同左		
	集合体配列ピッチ	mm	181.9	163.6		
3.燃料取扱条件						
(1)燃料交換本数	本	228	114			
(2)使用済燃料の崩壊熱	kW	18(炉停止21日後)	同左(炉停止17日後) ²⁾	最大燃焼集合体1体分		
4.搬出条件						
(1)搬出形態	健全燃料	-	水キャスク	同左		
	破損燃料	-	Heガスキャスク	同左	1体/基	
	制御棒	-	水キャスク	同左		
(2)搬出待貯蔵容量	本	2760(4炉心分)	3540(10炉心分)	再処理施設との取合条件(4年間の減衰待ち)より設		
5.燃料取扱時制限温度	基本方針	-	過熱破損防止	同左		
	長期事象(暫定)	燃料貯蔵	-	550°C以下	同左	
		燃料移送(1か月)	-	600°C以下(1か月以内)	同左	
	短期事象(暫定)	燃料移送(24時間)	-	630°C以下(24時間以内)	同左	
7.その他						
(1)破損燃料取扱方針		-	早期取出し後、炉外Na中貯蔵	早期取出し後、炉外Na中貯蔵		
(2)破損燃料貯蔵本数	本/プラント全体	6	同左	同左		

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

注2)Na冷却中型炉における使用済燃料の崩壊熱は、大型炉の計算結果から推定

注3)4年間の減衰待りに相当する貯蔵容量(0.75炉心)×プラント数+再処理施設事故による停止期間に相当する貯蔵容量(0.75炉心)×プラント数+炉心退避時間(1炉心、共用)により算出

表 2.1-2 燃料取扱設備検討条件(平成14年度)

項目	単位	平成14年度燃取条件	備考		
1.プラント基本条件					
(1)基本型式	-	モジュール炉(4モジュール+2タービン)			
(2)出力(熱/電気)	MW/基	1785/750			
(3)炉型式	型式	-	ルーブ型炉		
(4)原子炉建屋構造	型式	-	水平免震・上下耐震		
(6)原子炉構造 ¹⁾	型式	-	平成13年度のNa中型炉と基本的に同じ		
	原子炉容器	内径 高さ	mm mm	8300 23650	ルーフデッキ上面から原子炉容器下端まで
	炉心槽	外径	mm	5790	
	炉上部機構	基本方式 ハッフル及びH/Dフレート外径 切込み幅	mm	切込み付きコラム型 3600(ハッフル板)/3610(下端のH/Dフレート) 380(ハッフル板)/340(下端のH/Dフレート)	下端のH/Dフレート部の切込み幅は必要に応じて見直し
	回転プラグ	ルーフデッキ貫通孔径 ベアリング部外径	mm	4620 5290	
		RVとの偏心量	mm	365	
	燃料交換機設置位置	(炉心中心より)	mm	2055	
	炉内燃料受渡位置	(炉心中心より)	mm	3415	燃料交換機との取合位置
	炉外燃料受渡位置	(炉心中心より)	mm	3754	燃料出入機との取合位置(炉内案内管中心を基準とする寸法)
(7)プラント運転サイクル	月	18			
(8)プラント寿命	年	60			
(9)定検期間	日	32			
(10)炉心構成及び炉心配置	型式	-	ABLE型均質炉心		
	炉心構成(本数)	内側炉心燃料 外側炉心燃料 径方向ブランケット 主炉停止棒 後備炉停止棒 しゃへい体	本	158 156 150 25 10 270	
(11)燃料交換計画	バッチ数	炉心燃料 径方向ブランケット 制御棒	ハッチ数	4 4 1	
(12)地震条件	オペフロ及び原子炉容器上部での床応答曲線	S ₁ 地震 S ₂ 地震	-	M6.5に対応した平成13年度S ₂ 波の2/3倍 M6.5に対応したS ₂ 波は平成13年度と同じ。M7.1に対応したS ₂ 波は平成13年度の1.5倍(水平方向のみ)	
2.燃料集合体仕様					
	型式	-	MOX、ABLE型ダクト付き		
	全長	mm	4400		
	炉心高さ	mm	800		
	ブランケット高さ	mm	300(上部)/400(下部)		
	ダクト内対面間距離	mm	164.0		
	ダクト外対面間距離	mm	174.0		
	バッド間対面間距離	mm	177.6		
	燃料ピン数	本	271		
	燃料被覆管径	mm	8.5		
	燃料被覆管肉厚	mm	0.5		
	燃料ピン配列ピッチ	mm	9.81		
	スパーサワイヤ径	mm	1.26		
	スパーサワイヤ巻付ピッチ	mm	200		
	重量	kg	約450	燃料交換機の耐震検討用	
	集合体配列ピッチ	mm	178.0		
3.ナトリウムポット形状					
	型式	-	フィンなし、円筒型		
	収納本数	本	1		
	ナトリウムポット長	mm	4630	燃料長+230mm(原子炉容器軸長低減)	
	ナトリウムポット径	胴部 ハンドリングヘッド部	mm	330 365	
4.使用済燃料の崩壊熱					
(1)最大燃焼集合体1体分	(燃交開始時)	kW	21(炉停止17日後の数値)	崩壊熱曲線は実証炉データを使用	
(2)燃交2バッチ分	(燃交終了時)	MW	1.6(炉停止32.5日後の数値)	2モジュール連続の燃料交換に対して、実証炉データより推測	
5.燃料取扱条件					
(1)燃料交換本数	本	152		炉心構成、バッチ数より計算 (158+156)/4+150/4+35=152	
(2)炉内ナトリウム温度	℃	200			
(3)炉内ナトリウム液面レベル	-	炉心頂部より6m上(NsLより1.3m下方)			
(4)炉内カバーガス圧力	mmAq	100			
(5)炉内引抜荷重	ton	2.5			
(6)炉内許容偏心量	mm	25			
(7)燃交開始時期	(原子炉停止後)	日	17(炉停止18日めから開始)	50kW _e 、シングルプラントの数値であり、今後の検討進捗に伴い、変更	
6.搬出条件					
(1)搬出形態	健全燃料 破損燃料 制御棒	- - -	水キヤスク Heガスキヤスク 水キヤスク		
(2)搬出待貯蔵容量	モジュールプラント シングルプラント	炉心分	7 2.5	4年冷却(0.75炉心×4モジュール)+炉心退避(1炉心)+再処理設備の故障対応(0.75炉心×4モジュール)=7炉心	
7.燃料取扱時制限温度					
	基本方針	-	過熱破損の防止		
	長期事象	-	600℃(1か月)	崩壊熱減衰を考慮せず	
	短期事象	-	630℃(24時間)		
8.その他					
(1)破損燃料取扱方針	-	-	早期に取り出して、炉外Na中で貯蔵		
(2)破損燃料貯蔵本数	本	6		4モジュールの合計	
(3)全交流電源喪失時間	DBE	時間	0.5		
	BDBE	時間	2		

表 2.1-3 燃料交換機の比較評価

項目	パンタグラフ式燃料交換機		マニプレータ式交換機	
	グリッパ	昇降 爪開閉 回転 ¹⁾ 偏心追従 ¹⁾	ボールネジ駆動式 スプライン軸駆動式 スプライン軸駆動式(専用の駆動機構設置) ・グリッパ中央アクチュエータロッドのユニバーサルジョイント、球面状の受けを設置し、燃料芯ずれに合せて、グリッパを水平移動	・同左 ・同左 ・スプライン駆動式(爪開閉と共用) ・グリッパ中央アクチュエータロッドのユニバーサルジョイント、ベアリングを設置し、燃料芯ずれに合せて、グリッパを水平移動 ・ボールネジ駆動式(アームスイングと内部胴昇降機構の組み合せ) ・同左 ・内部胴昇降動作により対応
物量及びコスト	アーム	スイング	・ボールネジ駆動方式(上下アームと圧縮リンクの組み合せ) ・歯車駆動式 ・グリッパ昇降駆動機構を利用して、上限近傍でのストロークに合せて、グリッパ下端の押さえ板を下降	○
	ホルドダウン	旋回 ¹⁾ 昇降 ¹⁾	・アーム支持胴、圧縮リンクなどの炉内設置部分が増加 ・アームスイング関連の駆動機構数少 ・20ton + α	○
位置決め制御	形状寸法		・所定の位置決め精度の確保可能な見通し	○
	物量		280mm(アーム取付部は320mm) 5.31E+08 mm ⁴ 23.8mm(衝突せず) -	○ ○ ○
耐震性 ²⁾ (JISとの衝突の有無)	グリッパユニット幅	断面二次モーメント		
	アーム剛性	S ₁ 地震 S ₂ 地震 強地震		
技術課題	アーム面外方向変位		・実証炉マニプレータ式燃料交換機の要素研究をすることができるが、一部の要素研究は実施したほうが望ましい	○
			・類似の駆動機構を使用しており、コスト、位置決め精度、地震時アーム変位の差異小 ・物量、技術課題の必要性で若干不利 ・実証炉で進めてきたマニプレータ式から変更する意味なし	○
評価			・類似の駆動機構を使用しており、コスト、位置決め精度、地震時アーム変位の差異小 ・物量、技術課題の必要性で若干有利 ・実証炉にて確認済み	○
			・類似の駆動機構を使用しており、コスト、位置決め精度、地震時アーム変位の差異小 ・物量、技術課題の必要性で若干有利 ・実証炉にて確認済み	○

注1)燃料交換機の型式に依存せず

注2)ギャップを考慮しないモデルでの地震によるアーム曲げに、ギャップガタの影響によるアーム変位などを加算(かつこ内はJIS衝突の有無を記載)

表 2.1-4 燃料洗浄方式の比較評価

項目	湿式洗浄	乾式洗浄 ¹⁾
設備構成	<ul style="list-style-type: none"> ・洗浄槽、多重化した洗浄ガス系、洗浄水系等を設置 ・Arガス冷却、湿潤Arガス洗浄、水洗浄、乾燥の順番を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ・一般に、洗浄槽、多重化した洗浄ガス系等から構成されるが、EVST(又は、Naポット取扱設備)からの取出し時に、燃料出入機Arガス冷却系を使用する方策も有り ・燃料予熱、Arガス洗浄、Arガス冷却の順番を実施
経済性	<ul style="list-style-type: none"> ・100 ・300m² 	<ul style="list-style-type: none"> ・30(専用の洗浄槽を設置する方式では90) ・なし²⁾
安全性	<ul style="list-style-type: none"> ・冷却系の多重化や、移送系に期待(低発熱燃料)することにより対応可能 ・全交流電源喪失に対して、無停電電源に接続等の対応有り ・65分 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左
洗浄性能	<ul style="list-style-type: none"> ・懸念の必要なし(表面に水酸化Na生成) 	<ul style="list-style-type: none"> ・低速で水中浸漬することにより、Na-水反応を緩和。燃交時間への影響回避可能 ・水中浸漬前に、蒸気を混入したArガスを吹き付け等の運用工夫でも対応(燃料下端の水中浸漬時に発生する蒸気を利用する方策も有り得る)
洗浄時間	<ul style="list-style-type: none"> ・90% ・60分/体 	<ul style="list-style-type: none"> ・50%(専用の洗浄槽利用する等の方策により90%達成の可能性有り) ・20分/体
廃液発生量 ⁵⁾	<ul style="list-style-type: none"> ・632.3m³ ・2.8m³ 	<ul style="list-style-type: none"> ・204.2m³ ・14m³
実績	<ul style="list-style-type: none"> ・高速増殖実験炉、原型炉等での実績豊富 	<ul style="list-style-type: none"> ・洗浄試験を実施(付録2参照)
評価	<ul style="list-style-type: none"> ・実績豊富で、高洗浄性能に期待できるが、物量、廃液発生量が多いため、検討対象外 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料出入機・Arガス冷却系の使用など、物量、廃液発生量のいずれも湿式洗浄の約30%と大幅に低減できるため、レファレンス概念と設定 ・洗浄性能や、燃料被覆管制限温度への余裕は小さいが、設計対応可能

注1) 燃料出入機のアルゴンガス冷却系を使用してナトリウムをブローする方式

注2) 乾式洗浄では燃料出入機アルゴンガス冷却系、EVSTのアルゴンガス系を使用するため、専用の配置スペース不要

注3) 燃料発熱量4kWのケース

注4) 予熱時間は別

注5) 表2.1-5参照

◎: 有利、○: 要求条件を満足、△: 課題あり

表 2.1-5 燃料洗浄方式による廃液発生量の比較評価

対象	ナトリウム冷却中型炉	
	湿式洗浄 ¹⁾ (m ³ /年)	乾式洗浄 ¹⁾ (m ³ /年)
燃料出入機	グリッパ洗浄廃液 ²⁾	50.5
	ドリッパン洗浄廃液 ²⁾	50.5
洗浄設備	洗浄廃液 ³⁾	0
	逆洗廃液 ⁴⁾	20.5
使用済燃料プール冷却ろか器 浄化系	脱塩器 ⁵⁾	2.8
	廃液(移送水) ⁸⁾⁹⁾	12.0
キャスク	キャスク洗浄廃液 ¹⁰⁾	23.7
合計	廃樹脂	2.8
	廃液	632.2
		204.2

注1) 燃料1体の初期付着Na量400gに対して、湿式で90%、乾式で50%(80%程度まで改良の可能性有り)の洗浄性能を想定

注2) いずれも20m³/回の廃液が発生。3モジュール同時の燃交に対して、燃交前後に各1回、すなわち、1サイクル中に合計4回の燃料出入機グリッパ及びドリッパン洗浄を実施(水プール直接貯蔵方式では、燃料移送機が多い)

注3) 湿式洗浄では1.1m³/回の廃液発生。1.1m³×114体×6モジュール=752m³/サイクル。752m³×12か月/19か月、

注4) 8.1m³の逆洗廃液発生。8.1m³×2基×2セット(3モジュールごとに燃交)=32.4m³/サイクル。32.4m³×12か月、

注5) 湿式洗浄は通水量(190m³/h)、乾式洗浄はプール中へのNa持込み量によって、脱塩器のイオン交換樹脂量が決定。(脱塩器1基あたりのイオン交換樹脂量は、湿式洗浄で5.3m³、乾式洗浄で11.1m³)

注6) 湿式洗浄では、2×4560g(Na持込み量)÷23g(1当量での重量)÷800(実効イオン当量)÷0.67(カチオン樹脂割合)×6モジュール=4.4m³/サイクル。4.4m³×12か月/19か月=2.8m³/年

注7) 乾式洗浄では、2×22800g(Na持込み量)÷23g(1当量での重量)÷800(実効イオン当量)÷0.67(カチオン樹脂割合)×6モジュール=22.2m³/サイクル。22.2m³×12か月/19か月=14.0m³/年

注8) 湿式洗浄では、22.6m³(脱塩器の廃液)×0.42回(1サイクルでの交換頻度)×2基=19.0m³/サイクル。19.0m³/サイクル×12か月/19か月=12.0m³/年

注9) 乾式洗浄では、46.9m³(脱塩器の廃液)×1回(1サイクルでの交換頻度)×2基=93.4m³/サイクル。93.4m³/サイクル×12か月/19か月=59.0m³/年

注10) 1サイクル中のキャスク取扱数は76回。0.5m³/回×76回×12か月/19か月=23.7m³

表 2.1-6 燃料取扱方式物量の比較評価

対象	水プール直接貯蔵方式 ガス雰囲気方式			水プール直接貯蔵方式 ナトリウム充満方式			EVST貯蔵方式		
	基本仕様 ハンダグラフ式(又は、マニフレータ式)	物量(ton)	基数	基本仕様 マニフレータ式(又は、ハンダグラフ式)	物量(ton)	基数	基本仕様 マニフレータ式(又は、ハンダグラフ式)	物量(ton)	基数
炉内燃料移送系	燃料交換機 炉内中継装置	20	1基	マニフレータ式(又は、ハンダグラフ式)	20	1基	マニフレータ式(又は、ハンダグラフ式)	20	1基
炉外燃料移送系	燃料出入機	175	1基	回転式 レールレス式(収納筒1基、Naポット専用、空気間接冷却系2系統)	160	1基	回転式 レールレス式(収納筒1基、Naポット及び裸燃料、Aガス直接冷却及び空気間接冷却系2系統)	180	1基
燃料貯蔵系	使用済燃料移送関連		1基	Naポット取扱設備(ガス雰囲気)	50	1基			
	使用済燃料関連		1基	回転移送機	120	1基			
	新燃料関連		1基	燃料昇降装置	35	2基	燃料昇降装置	15	1基
			1基	水中台車	10	1基	水中台車	10	1基
			1基	使用済燃料プール移送機	50	1基	使用済燃料プール移送機	50	1基
			1基	新燃料移送機	50	1基			
燃料貯蔵系	使用済燃料プール	555	1基(3344体)	使用済燃料プール	555	1基(3344体)	炉外燃料貯蔵槽	470	1基(398体)
	新燃料貯蔵トラック	130	1基(304体)	新燃料貯蔵トラック	130	1基(304体)	使用済燃料プール 新燃料貯蔵トラック(新燃料中継槽を含む)	470 20	1基(2992体) 1基(30体)
	燃料洗浄設備		2基	乾式燃料洗浄設備(回転移送機のアクセス可能な位置に2基設置)	110	1基	乾式燃料洗浄設備(EVST上での洗浄、燃料出入機の冷却系使用)	25	1基
燃料処理系	破損燃料取扱関連		1基	燃料検査設備	20	1基	燃料検査設備	20	1基
			6基	Naポット貯蔵設備	20	6基			
物量合計			1330	1315			1300		

2.2 検討条件

平成 15 年度は、検討対象を実用化戦略調査研究で検討中のナトリウム冷却中型炉（75 万 kWe×4 モジュール）[1]とした。ナトリウム冷却中型炉の基本仕様を表 2.2-1、集合体概念、炉心配置図、原子炉構造、系統構成図、配置図をそれぞれ図 2.2-1～7 に示す。燃料取扱設備の検討条件は MOX 燃料・高内部転換型炉心（平衡期）への適用を前提に設定した。燃料取扱設備の検討条件を表 2.2-2 に示す。平成 14 年度の検討条件に対して、燃料形状の大型化、運転サイクルの長期化、ブランケット燃料削除に伴う燃料交換本数の低減などの点で相違している。集合体発熱量の条件、燃料要素の熱容量を表 2.2-3、表 2.2-4 に示す。また、燃料取扱設備の安全に係わる検討方針を表 2.2-5、EVST 方式、水プール貯蔵方式の対応方針を比較して表 2.2-6 にまとめた。

表 2.2-1 ナトリウム冷却中型炉の主要仕様

項目	基本仕様
原子炉型式	ループ型 (4 モジュールプラント)
電気出力 (発電端)	750MWe
熱出力	1785MWt
ループ数	1 次系 2 ループ、2 次系 1 ループ
1 次冷却材温度	550/395°C
2 次冷却材温度	520/335°C
1 次系流量	1.64 × 10 ⁴ t/h
2 次系流量	2.73 × 10 ⁴ t/h
主蒸気温度/圧力	495°C/16.67MPa
給水温度/流量	233°C/2.84 × 10 ³ t/h
タービン発電機	蒸気タービン
プラント効率	約 42%
プラント稼働率	95.6%
炉心・燃料	MOX 高内部転換型炉心
反応度制御方式	制御棒方式
燃焼度	15 万 MWd/t
増殖比	1.03
原子炉停止系	主および後備炉停止棒
炉心安全性	①受動的炉停止方策：SASS ②CDA 防止強化策：ABLE 型集合体
炉容器型式	縦置き円筒容器上吊り型有液面式
炉心上部機構	一体型コラム方式
1 次系配管方式	上部流入方式
中間熱交換器	1 次ポンプ組込縦置無液面斜行流式直管型
1 次主循環ポンプ	中間熱交換器内組込、単段片吸込方式
蒸気発生器	縦置有液面 2 重管直管型
2 次主循環ポンプ	単段片吸込方式
崩壊熱除去方式	DRACS1 系統+PRACS 2 系統
漏えい対策	GV、外管、エンクロージャ、空気冷却器 2 重管化
プラント運転サイクル	26 ヶ月、4 バッチ方式
免震	水平免震
プラント寿命	60 年以上
原子炉建屋	原子炉建屋容積：約 9800m ³

表 2.2-2 平成15年度 燃料取扱設備の検討条件

項目	単位	燃料取扱設備の検討条件	
		平成15年度	平成14年度(参考)
1.プラント基本条件 (1)基本型式	-	モジュール炉 (4モジュール+2タービン)	同左
(2)出力(熱/電気)	MW/基	1785/750	同左
(3)炉型式	-	ループ型炉	同左
(4)原子炉建屋構造型式	-	水平免震・上下耐震	同左
(5)プラント運転サイクル	月	26	18
(6)プラント寿命	年	60	60
(7)定検期間(標準定検)	日	31	32
(8)炉心構成及び炉心配置	-	嵩内部軽換型、ABLE型均質炉心	従来型、ABLE型均質炉心
(9)燃料交換計画	型式		
	炉心構成(本数)	本	158
	内側炉心燃料	本	156
	外側炉心燃料	本	150
	径方向ブランケット燃料	本	25
	主炉停止棒	本	7
	後備炉停止棒	本	10
	しゃへい体	本	270
	炉心燃料	ハッチ数	4
	径方向ブランケット燃料	ハッチ数	4
制御棒	ハッチ数	1	
2.燃料集合体仕様	型式	MOX、ABLE型ダクト付き	同左
	全長	mm	4400
	炉心高さ	mm	1000
	ブランケット高さ	mm	800
	ダクト内対面間距離	mm	300(上部)/300(下部)
	ダクト外対面間距離	mm	164.0
	バンド間対面間距離	mm	174.0
	燃料ピン数	本	177.6
	燃料被覆管径	mm	271
	燃料被覆管厚	mm	8.5
	燃料ピン配列ピッチ	mm	0.5
	スペーサーワイヤ径	mm	9.81
	スペーサーワイヤ巻付ピッチ	mm	1.26
	集合体配列ピッチ	mm	同左
	mm	mm	178.0
4.使用済燃料の崩壊熱 ¹⁾	kW	22.5(10%誤差を含む、炉停止17日後)	21(10%誤差を含む、炉停止17日後)
(1)最大燃焼集合体1体分	MW	3.8(10%誤差を含む、燃交ハッチ分、1モジュールの炉停止64日後)	1.8(10%誤差を含む、燃交2ハッチ分、1モジュールの炉停止32.5日後)
(2)燃料交換分			
5.燃料取扱条件	本	112	152
(1)燃料交換本数	日	17(炉停止18日めから開始)	同左
(2)燃料交換開始時期	-	水キヤスク	同左
(3)搬出形態	-	Heガスキヤスク	同左
(4)搬出待貯蔵容量	-	水キヤスク	同左
	炉心分	5(炉心燃料333本×5炉心+破損燃料6本=1671本)	7(炉心及びブランケット燃料464本×7炉心+破損燃料6本=3254本)
6.燃料取扱時制限温度	基本方針	DBEでの燃料破損の防止	同左
	長期事象	600℃(1か月以内)	同左
	短期事象	630℃(24時間以内)	同左
7.その他	-	早期に取り出して、炉外Na中で貯蔵	同左
	本	6	同左
	時間	0.5	同左
	時間	2	同左

注1)平成14年度の数値は、大型炉(1500MWe x ツイン、MOX燃料・従来型炉心)からの推定値

表 2.2-3 燃料発熱量に係る検討条件

燃料崩壊熱(ノミナル)

炉停止後日数 (日)	最大燃焼集合体 ¹⁾ (kW)	燃交1バッチ ²⁾ (MW)	1炉心 ³⁾ (MW)
0	493.0	26.4	103.5
1	52.6	2.8	10.9
3	38.0	2	7.9
5	31.8	1.7	6.5
7	28.0	1.5	5.7
9	25.5	1.4	5.2
11	23.7	1.3	4.8
13	22.3	1.2	4.5
15	21.3	1.2	4.3
17	20.4	1.1	4.1
19	19.6	1.1	4.0
20	19.3	1	3.9
25	17.8	1	3.6
30	16.7	0.9	3.4
90	11.1	0.6	2.3
180	8.1	0.4	1.6
365	5.3	0.3	1.1
730	3.3	0.2	0.7
1460	2.0	0.1	0.4
2190	1.7	0.1	0.4

注1) 炉停止17日後に高内部転換型炉心20.4kW、従来型炉心19.9kW

注2) 炉停止17日後に高内部転換型炉心1.1MW、従来型炉心1.0MW

注3) 炉停止100日後に高内部転換型炉心2.2MW、従来型炉心0.9MW

その他のデータ

項目	単位	数値	
最高燃焼度燃料ピンの 内圧及び応力	内圧	MPa	12.3
	被覆管周方向応力	MPa	114.5
最高燃焼度燃料の崩壊 熱	燃料集合体	kW	28.0
	燃料ピン	kW	0.1
	燃料ピンピーク	W/cm	1.4

表 2.2-4 燃料要素部の熱容量

項目	平成 15 年度	平成 14 年度
燃料ピン外径 mm	10.4	8.5
燃料ピン内径 mm	8.98	7.5
炉心高さ mm	1000	800
ピン数	217	271
燃料被覆管 (ODS 鋼) 体積 m ³ /集合体	4.69×10^{-3}	2.72×10^{-3}
MOX 燃料ペレット体積 m ³ /集合体	1.23×10^{-2}	7.85×10^{-3}
熱容量 kJ/K*1	65.7	43.3

*1: MOX 燃料ペレット比重 $1.09 \times 10^4 \text{kg/m}^3$ 、比熱 $0.356 \text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ 、スミア密度 82%

ODS 鋼比重 $7.69 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、比熱 $0.609 \text{kJ/kg} \cdot \text{K}$

MOX 燃料ペレット熱容量 = 体積 × 比重 × 比熱 × スミア密度 / 100

燃料被覆管 (ODS 鋼) 熱容量 = 体積 × 比重 × 比熱

炉心部熱容量 = MOX 燃料ペレット熱容量 + 燃料被覆管 (ODS 鋼) 熱容量

表 2.2-5 (1/2) 燃料取扱設備の安全設計方針

安全機能	平成 14 年度設定結果	平成 15 年度	検討項目
<p>臨界防止対策</p>	<p>臨界防止</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 臨界にならない貯蔵ラックのポット収納配列及びピッチにすること ・ 地震時にも著しく幾何学的配置が変化しないように、耐震構造設計とすること <p>EVST 設計上は、臨界ピッチは幾何学的配列、SUS 案内管の効果をとり込んで有限体系で設定 EVST では幾何学的ピッチの大きい方で貯蔵ラックの配列ピッチが決まる見通し 新燃料貯蔵は冠水を考慮して無限増倍率に余裕を考慮して設定 水プール貯蔵は SUS の吸収管を考慮して無限増倍率に余裕を見て設定</p>	<p>臨界防止 同左</p> <p>同左</p>	<p>EVST 及び水プール貯蔵の臨界ピッチについては集合体内の重金属量が平成 14 年度までの約 1.5 倍となるため評価を実施する。</p>
<p>取扱中の破損防止対策</p>	<p>落下防止</p> <p>もんじゅ、実証炉と同様の落下防止対策に加えてドアバルブ誤閉等に対応した落下防止対策を実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ポットまたは燃料集合体を昇降途中ではドアバルブが誤閉しない機械的機構（機械的インターロック） ・ ポットまたは燃料集合体を吊り、駆動している吊り具を切断することのできないドアバルブ閉作動駆動概念（誤閉時の切断回避） ・ 不十分な掴み状態でのつり上げを防止するための機械的機構（機械的インターロック） <p>上記により安全評価上もガス中燃料落下事故を防止する。ガス中落下については緩衝装置等の設置により万が一の燃料大規模破損を防止する。</p> <p>なお、ナトリウム中及び水中落下については破損しても冷却体系が維持可能であるが、雰囲気により条件を要えることは困難であるため、燃料取扱全般での燃料落下防止を狙う。</p> <p>他機器との干渉防止</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 各機器設備との間で炉心構成要素の受け渡しが行なわれている間は、これに関わる機器設備の作動によって干渉する恐れのある操作ができないよう電気的なインターロックを設ける（ドアバルブと燃料移送系機器との干渉防止を含む） ・ 取り扱うべき炉心構成要素の設定位置と位置決め完了の実際の位置が一致していなければ次の取扱操作ができない電気的なインターロックを設ける <p>転倒・衝突防止</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 燃料出入機（未減衰燃料移送設備）は転倒・衝突を防止すること ・ 燃料出入機、回転ラック等は通常取り扱い時及び地震時にも傾いたり、転倒しないような耐震構造とすること ・ 燃料取り扱い中の移送系、燃料位置決め系の誤作動を防止し、他機器もしくは炉心構成要素との衝突を防止する設計とする。 	<p>落下防止 同左</p> <p>他機器との干渉防止 同左</p> <p>転倒・衝突防止 同左</p>	
<p>過熱防止対策</p>	<p>燃料の過熱防止</p> <p>過熱による燃料破損を防止することで燃料破損時のバースト破損による燃料冷却体系阻害を防止。従来想定していない事象のうち実用炉段階で考慮すべき特定事象（2 時間程度の全電源喪失等）はガス中未減衰燃料での冷却体系保持により事象終息させるため、燃料破損防止を狙う。</p> <p>CDF < 0.1 以下とするように燃料被覆管温度を制限</p> <p>ポット移送時の被覆管温度制限</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 短時間（24h 以下）：630℃ 以下 ・ 長時間（1ヶ月以下）：600℃ 以下 ・ EVST 貯蔵時被覆管温度制限：550℃ <p>ガス中裸燃料移送時の制限温度は、冷却ガスがない場合ガスプレナム温度上昇が遅く、冷却ガス流量がある場合には逆にガスプレナム温度が高くなるなど状態によって制限温度を変更することも考えられる。</p> <p>昇降停止対策</p> <p>裸燃料の吊り上げ・吊り下ろし時の駆動装置の特殊位置での停止事故にも、時間余裕を有して手動により事故時対応により冷却性が確保できる設計とすること （燃料移送停止事故条件では手動操作で過熱防止対応し、特殊位置でのスティックは、時間余裕を考慮して終息させる対応）</p> <p>全電源喪失</p> <p>2 時間の継続を想定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 燃料を制限温度以下に維持する設計とする （ガス中燃料は破損時の冷却体系確保が説明できず破損防止必要、ナトリウム中燃料は破損防止可能） 	<p>燃料の過熱防止 同左</p> <p>昇降停止対策 同左</p> <p>全電源喪失 同左</p>	<p>平成 14 年度では乾式洗浄直後に冷却不能となった場合に時間余裕がないことから、燃料集合体変更に伴う余裕時間の評価を行う。</p> <p>また、集合体発熱量増加に対応して想定する 2 集合体ポットでの冷却性を評価する</p> <p>燃料の熱容量は 1.5 倍となるため、無停電電源容量を低減する検討を実施。</p>

表 2.2-5 (2/2) 燃料取扱設備の安全設計方針

安全機能	平成 14 年度設定結果	平成 15 年度	検討項目
過熱防止対策	<p>ナトリウムボット液位保持</p> <p>ボットからのナトリウム漏洩事故は使用前の検査と荷重による漏洩検出を条件として、想定外事象と位置付ける。</p> <p>移送設備の冷却系統構成</p> <ul style="list-style-type: none"> 移送設備は移送系+2系統の非常用冷却系で構成 炉心構成要素の最大発熱量に対して冷却が可能なものとする <p>貯蔵系の冷却系統構成 (EVST)</p> <ul style="list-style-type: none"> 通常時冷却系統は1次系、2次系のナトリウム自然循環及び自然通風により、同様に電源喪失時にも冷却性を維持できる独立3系統、または2次系ナトリウム及び空気冷却系の強制通風方式の独立3系統。 スタックの設置及び系統の分離が必要 <p>貯蔵設備での燃料露出防止</p> <p>未減衰燃料の燃料貯蔵容器が破損しても燃料発熱部が露出しないようにすること (外容器により担保)</p>	<p>ナトリウムボット液位保持</p> <p>同左</p> <p>移送設備の冷却系統構成</p> <p>同左</p> <p>貯蔵系の冷却系統構成 (EVST)</p> <ul style="list-style-type: none"> 強制冷却により冷却する。全電源喪失時には2時間を想定しても熱容量にて確保できるものとする。 4モジュールに対しては EVST 内の崩壊熱が常時維持された条件に対応した系統数を確保する。 <p>貯蔵設備での燃料露出防止</p> <p>同左</p>	<p>常時崩壊熱がある条件での安全ロジックの成立性を検討する。その上で100%×3系統または50%×4系統等の方式を選定する。</p>
ナトリウム火災防止対策	<p>空気侵入防止</p> <ul style="list-style-type: none"> ナトリウムバウンダリとなる配管の外を管で覆い、アニュラス部を不活性雰囲気 空気冷却器伝熱管は2重管構造として内管・外管の破損検出可能な設計 	<p>空気侵入防止</p> <p>同左</p>	
放射能防護対策	<p>公衆被曝の防止</p> <p>以下の対策で公衆被曝制限を満足する設計とすること</p> <ul style="list-style-type: none"> 未減衰燃料を収納する機器の漏洩率1%/d以下 取扱領域はコンファインメントを保持し、フィルタによるヨウ素除去率99%を確保し、スタックにより高所放出 (実用化戦略で DBE での燃料破損防止した場合の評価事象の位置づけ要検討) <p>FP ガスの室内への漏洩防止対策</p> <ul style="list-style-type: none"> 重要なシール部の二重シール中間に清浄な加圧アルゴンガスを供給し、シール部からの FP ガスの外部漏洩防止するシール構造及び運用とする (上記空気侵入防止と同様) <p>遮蔽対策</p> <p>通常時の作業のために立ち入りを必要とする場所、機器の周りに放射能遮蔽を行なうこと</p>	<p>公衆被曝の防止</p> <p>同左</p> <p>FP ガスの室内への漏洩防止対策</p> <p>同左</p> <p>遮蔽対策</p> <p>同左</p>	

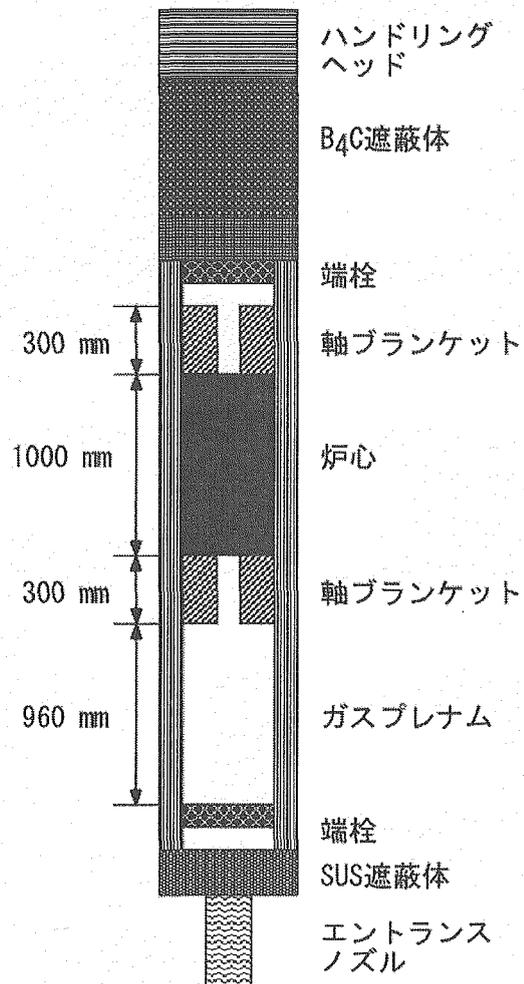
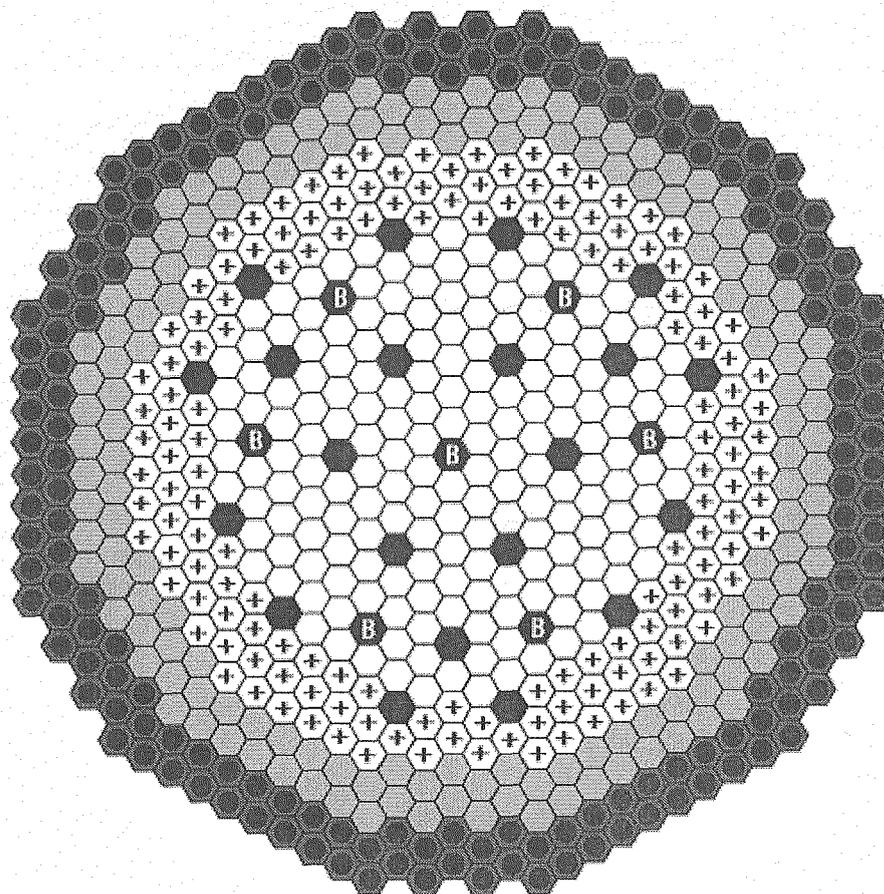


図 2.2-1 ナトリウム冷却中型炉の燃料集合体概念図[1]



○	内側炉心燃料集合体	183体	●	B ₄ C遮へい体	174体
⊕	外側炉心燃料集合体	150体	●	主系制御棒	21体
●	SUS遮へい体	150体	ⓑ	後備系制御棒	7体

図 2.2-2 ナトリウム冷却中型炉の炉心配置図（平衡期）[1]

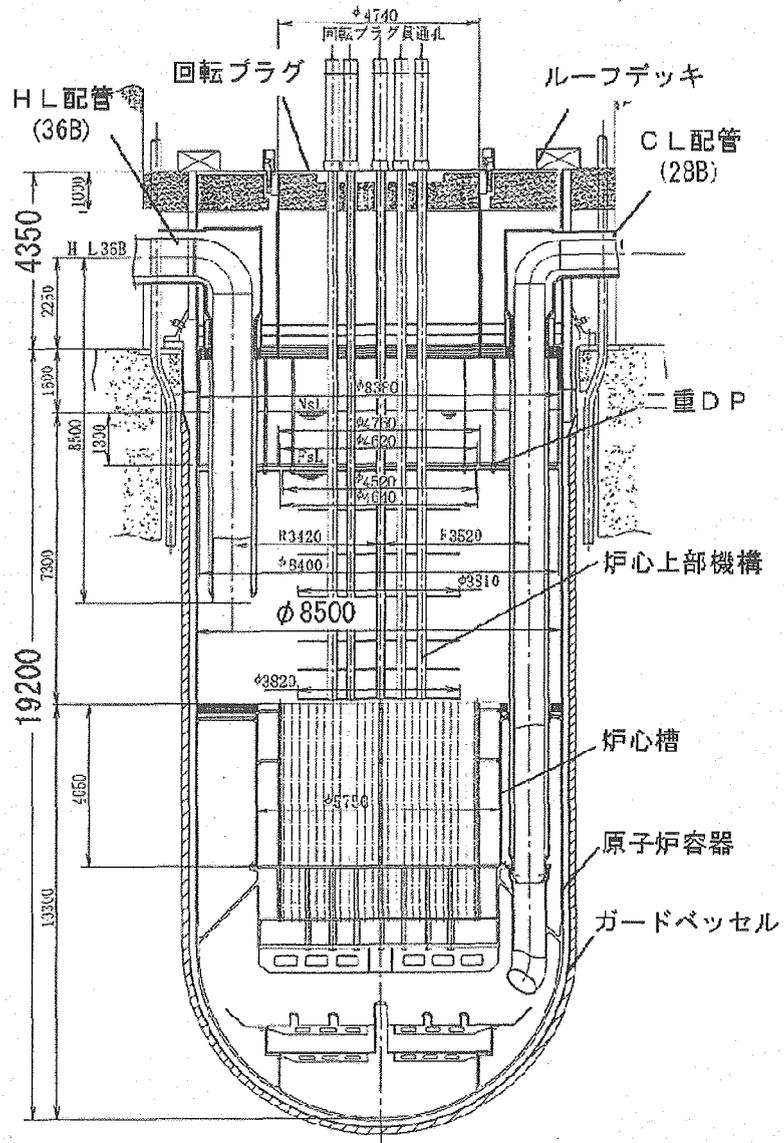


図 2. 2-3 ナトリウム冷却中型炉の原子炉容器構造概念図[1]

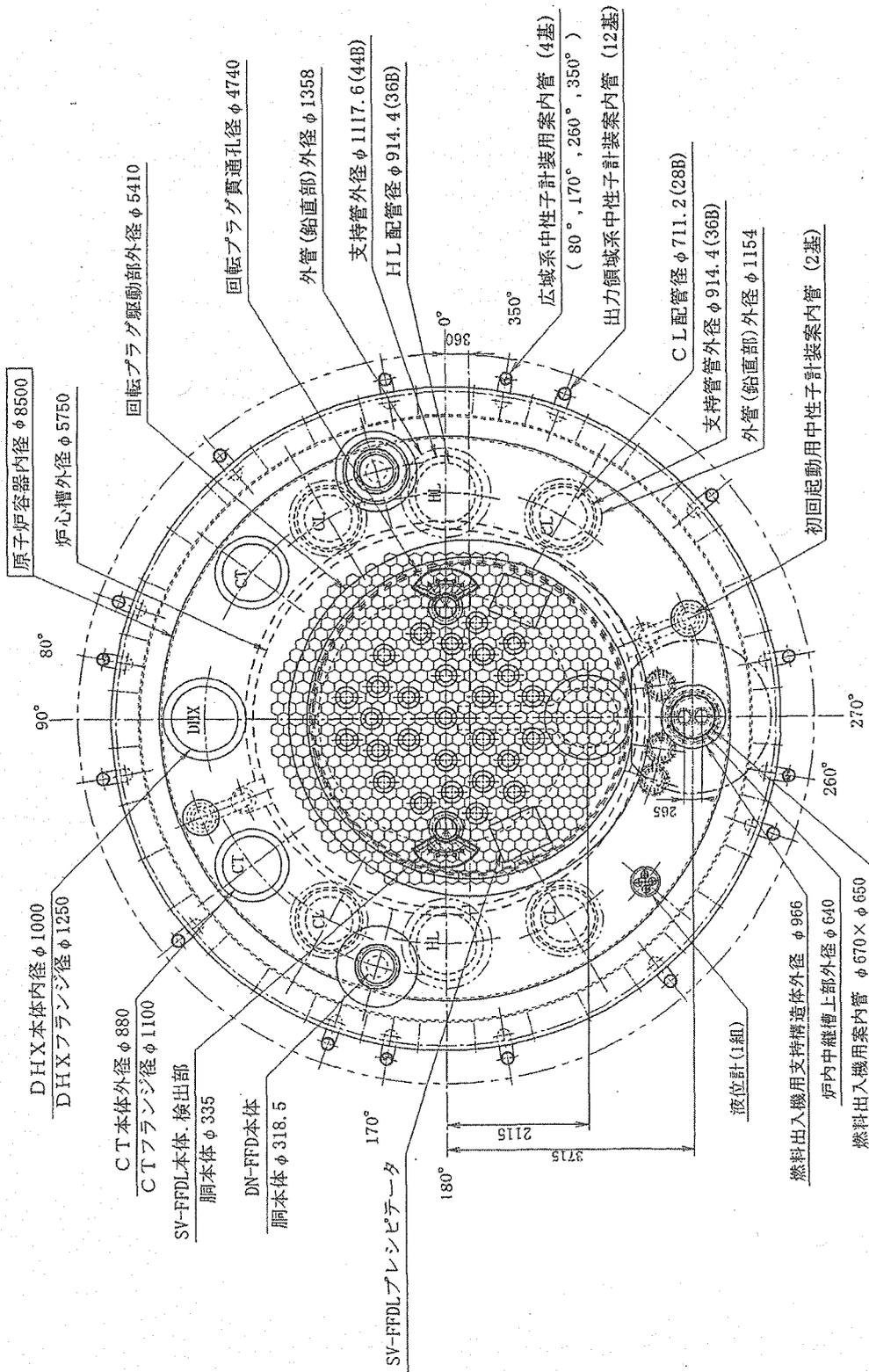
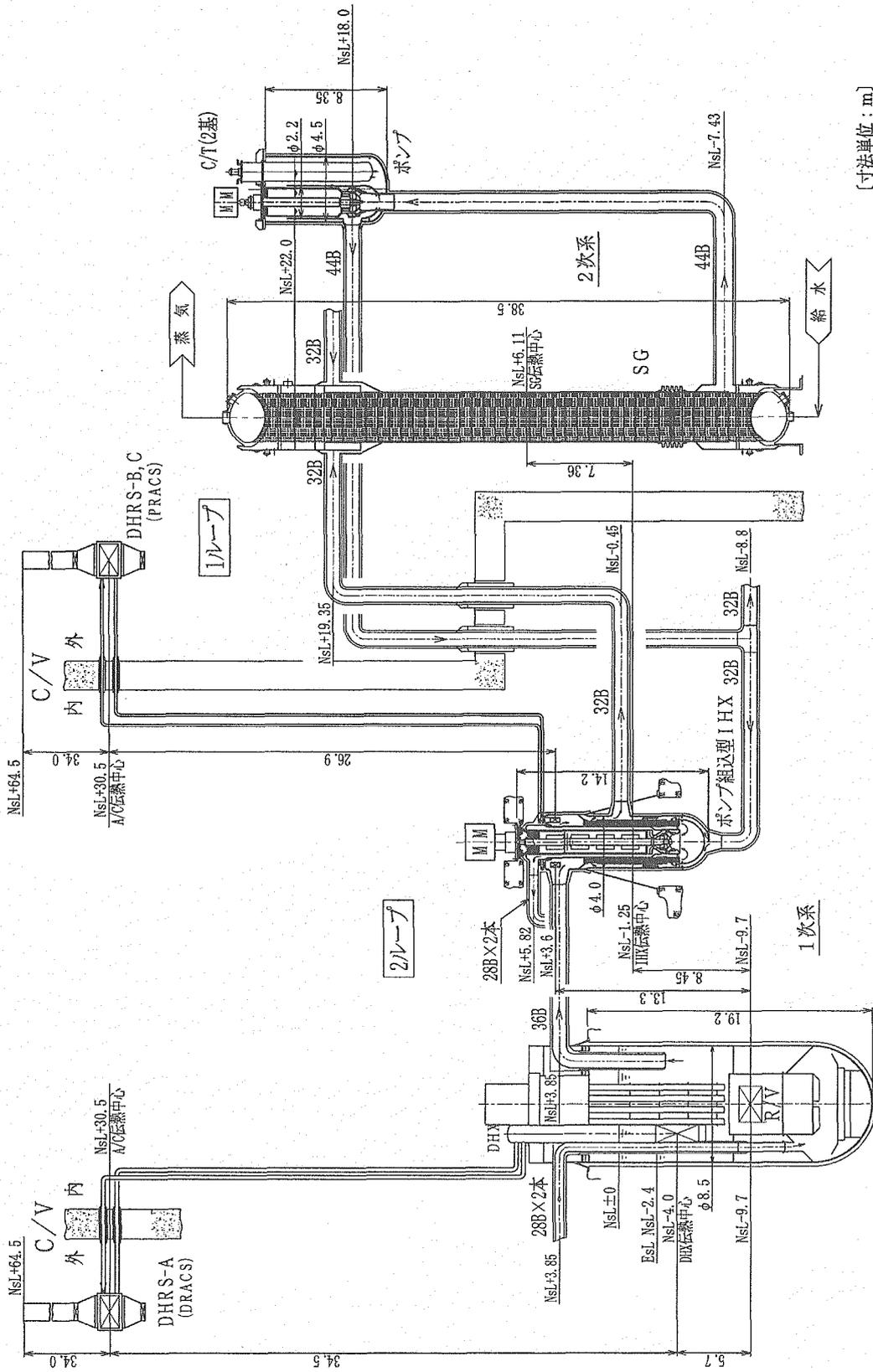


図 2.2-4 ナトリウム冷却中型炉の原子炉構造断面図[1]



[寸法単位: m]

図 2.2-5 ナトリウム冷却炉の系統構成図 [1]

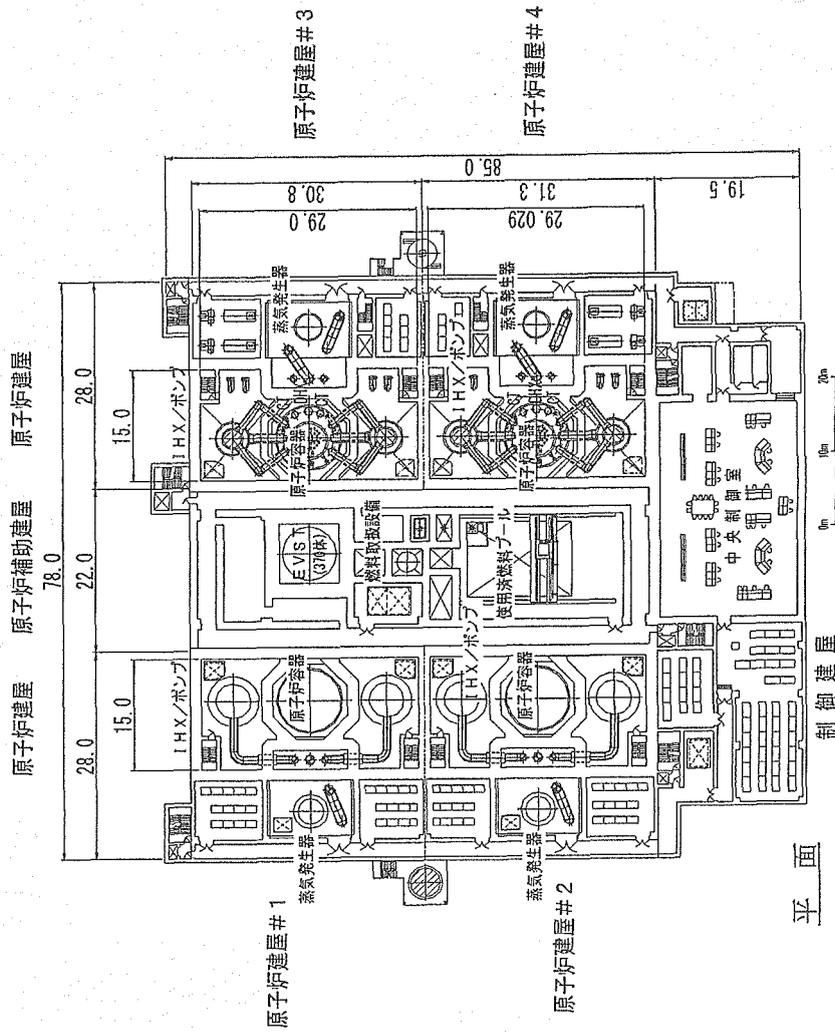
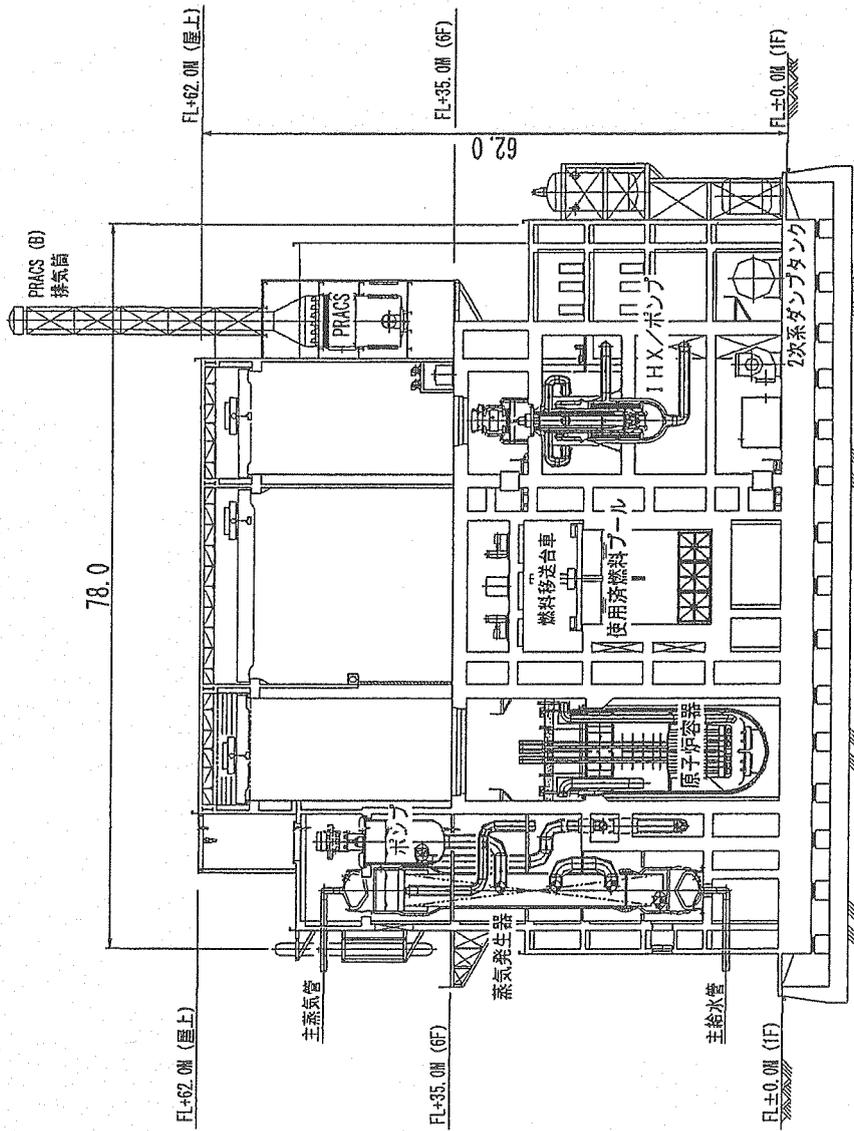


図 2.2-6 ナトリウム冷却中型炉の建屋配置平面図[1]



立面

図 2.2-7 ナトリウム冷却中型炉の建屋配置立面図 [1]

3. 中型モジュールプラントの燃料取扱設備の検討

3.1 燃料交換機

3.1.1 構造概念検討

ここでは平成 14 年度にレファレンスとして選定されたマニプレータ式の燃料交換機について概念具体化を実施した。マニプレータ式燃料交換機は、炉心-炉内中継装置間で新燃料、使用済燃料の受渡しを行う機器で、切込み付きコラム型炉心上部機構と単回転プラグと組み合わせて使用する。この燃料交換機には、以下の燃料取扱に係る機能（安全機能を除く）が要求される。

- ① 燃料のつかみおよび離し、昇降を行えること（グリッパ爪開閉、昇降）
- ② 炉心から燃料を引抜く際に、隣接する燃料の浮き上り量を一定値以下に制限すること（ホールドダウン機能）
- ③ 燃料を炉心に挿入する際に、燃料を所定の方位に設定できること（グリッパ回転）
- ④ 燃料のスエリング、クリープ等の変形による抗力に対して、最大 2.5ton（燃料重量を含む。ただし、実証炉での数値で、燃料設計の進捗に伴い、見直す必要あり）の挿入力および引抜力を有すること（グリッパ昇降）
- ⑤ 燃料を保持し、回転プラグの回転動作と連動して、炉内および炉内中継装置との受渡し位置への回転移送および位置決めを行えること（アーム伸縮および旋回）
- ⑥ グリッパおよび燃料の偏心に対して、グリッパが追従可能なこと（グリッパ偏心追従機構）
- ⑦ 炉心上部機構の切込み部内で、円滑にアームを伸縮できること。切込み部内にアームが存在する状態で S₁ 地震が発生しても、炉心上部機構と衝突しないこと。一方、S₂ 地震に対して、燃料落下しない限り衝突を許容しても構わないが、衝突時の影響評価、研究開発の必要性、許認可対応などの観点より、衝突しないことを目指した。（燃料交換機の耐震クラスは、B（S₂））

マニプレータ式燃料交換機の主要仕様を表 3.1.1-1、構造概念図を図 3.1.1-1 および図 3.1.1-2、駆動原理図を図 3.1.1-3 に示す。^{注1)} 従来の燃料交換機に対して、炉心上部機構の切込み部内をアーム伸縮する点が相違する。アーム伸縮は、クランク方式によりボールネジ駆動から変換するが、内部胴昇降動作を組み合わせることにより、グリッパユニットを上方向一定に維持できるように工夫した。^{注2)} また、地震時にグリッパユニットと炉心上部機構が衝突しないように、グリッパユニット後方にアームおよびグリッパ駆動機構を配置して、グリッパユニット幅を小さくするとともに（最下層の炉心計装取付板での切込み幅 360mm^{注3)} に対して、グリッパユニット幅 289mm)、左右のアーム側板を接続して、コの字型のアーム断面を実現することにより、水平方向のアーム剛性を向上した。

注 1) 平成 14 年度の原子炉構造に対する概念図。平成 15 年度には、回転プラグ偏心量や、燃料交換機設置位置などの原子炉構造の変更を実施しており、例えば、燃料交換機のアーム長は 1690mm から 1755mm に増加。

注 2) 現状設計では、図 3.1.1-1 に示したように、アーム上方の軸受はアルゴンガス中、下方の軸受はナトリウム中に浸漬している。ナトリウム中に浸漬することにより軸受寿命が増加すると考えられるが、以下の理由で選択しなかった。(図 3.1.1-4 参照)

- ① ナトリウム液面上昇対応 (約 1000mm)^{注 4)} : 原子炉容器重量などへの影響大
- ② アームおよびユニバーサルジョイント角度の変更 (23.6° から 31.7° に変更、炉内中継装置へのアクセス時) : 角度大で荷重伝達効率が低下。また、既往要素試験では 22° ~ 30° までの角度を対象
- ③ アームおよびユニバーサルジョイント位置の低下 (約 1000mm) : グリップユニット重心位置が下がり、安定性に課題

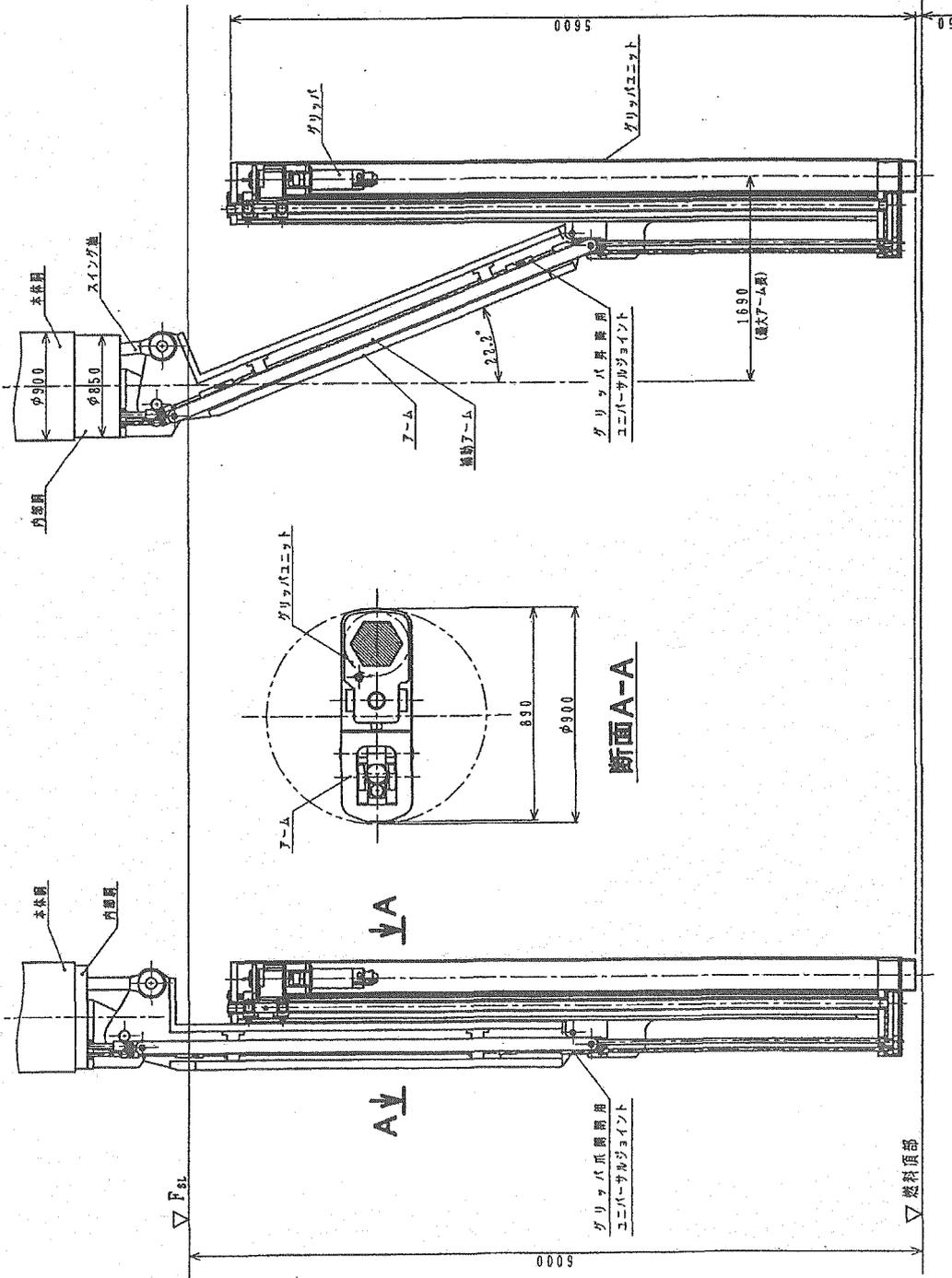
注 3) 平成 14 年度と同一の考え方では切込み幅 347mm (=平成 14 年度の切込み幅 340mm + 燃料形状の増加影響 7mm (=配列ピッチ差 $\times 3^{1/2}/2$)) となるが、炉心上部機構の構造上の上限値として、360mm を設定した。ただし、原子炉構造側では、最終的に 350mm の切込み幅を設定しており、今後の調整が必要である。

注 4) 幾何的に最小限必要な液面上昇幅 400mm + 余裕

表 3.1.1-1 マニプレータ式燃料交換機主要仕様

項目		単位	内容
型式		-	マニプレータ式
設置位置		-	回転プラグ上
基数		基	1
最高使用圧力		MPa	0.1/0.1(内圧/外圧)
最高使用温度		°C	250
機器種別		-	第4種機器
耐震クラス		-	B(S ₂) ¹⁾
主要材料		-	SUS304
主要寸法	グリッパユニット平面寸法	mm	890×289
	グリッパユニット高さ	mm	5600
	アーム長さ	mm	炉心中心側：1690
		mm	炉内中継装置側：1792.5
	本体胴径	mm	φ900
	アーム及びユニバーサル ジョイント角度	°	炉心中心側：22.2
°		炉内中継装置側：23.6	
雰囲気		-	ナトリウム、アルゴンガス
取扱対象	取扱対象物	-	炉心燃料、制御棒、遮へい体
	取扱容量	本/回	1
挿入引抜力	(取扱対象物を含む)	ton	2.5
グリッパ偏心量		mm	25

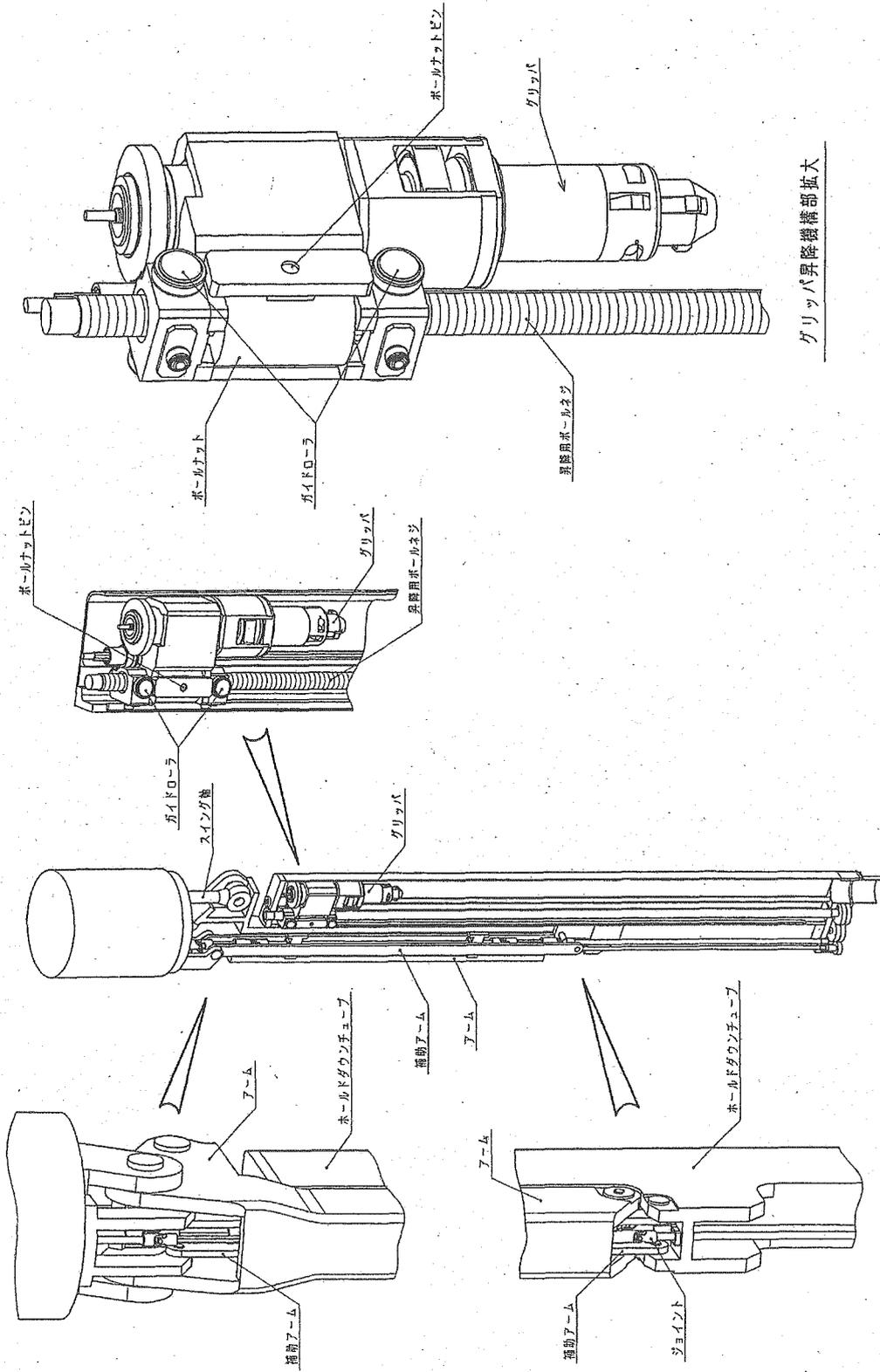
注1) (S₂)について、燃料取扱部は落下防止、カバーガスバウンダリ構成部はバウンダリ維持を意味する



炉心上部機構切込み部内でのアーム伸長時

アーム折りたたみ時

図 3.1.1-1 マニプレータ式燃料交換機構造概念図



グリッパ昇降機構部拡大

図 3.1.1-2 マニプレータ式燃料交換機構概念図 (グリッパユニット廻り)

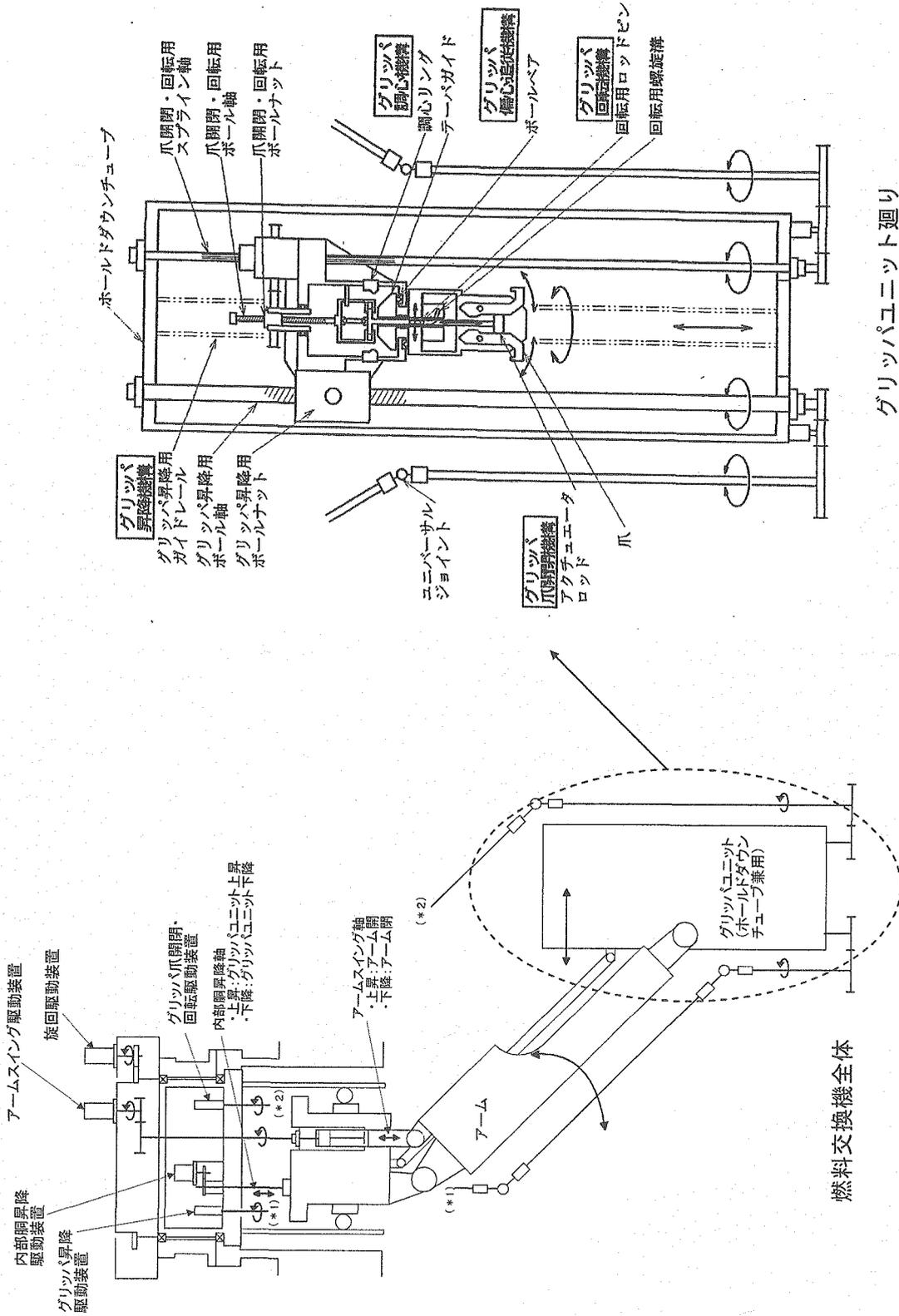


図 3.1.1-3 マニプレータ式燃料交換機駆動原理図

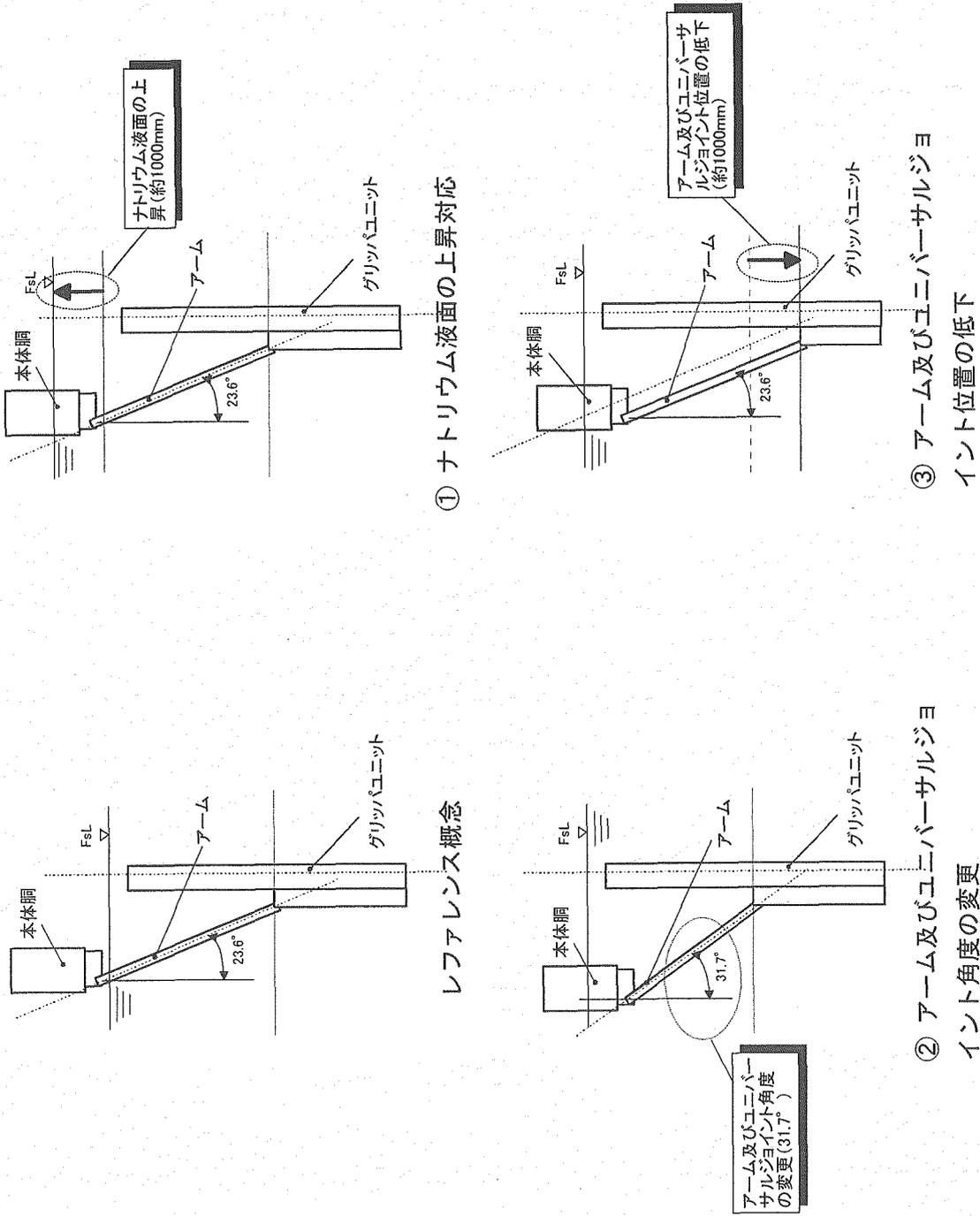


図 3.1.1-4 アーム軸受け及びユニバーサルジョイントのナトリウム浸漬対応

3.1.2 耐震性評価

(1) 概要

切込み付きコラム型炉心上部機構に対応したマニプレータ式燃料交換機固有の課題として、地震時における切込み部でのアーム変位を解析検討し、炉心上部機構との衝突の有無を評価した。

(2) 解析条件

(a) 荷重条件

- ① 地震条件：図 3.1.2-1（ただし、レファレンス S₂ 地震に対して、S₁ 地震は 2/3 倍、強地震検討用水平動は 3/2 倍）
- ② その他の荷重：燃料交換機自重＋燃料重量（450kg）

(b) 主要な形状条件

- ① グリッパユニット幅：289mm
- ② 炉心上部機構切込み幅（最下層の炉心計装取付板）：360mm

(c) 判断条件

- ① S₁ 地震：燃料交換機アームと炉心上部機構が衝突しないこと
- ② S₂ 地震および強地震検討用水平動：衝突を許容する選択肢もあり得るが、衝突時の影響評価、研究開発の必要性、許認可対応などの観点より、衝突しないことを目指す

(d) その他

- ① 炉心上部機構の地震変位：S₁ 地震 3mm、S₂ 地震 4mm、強地震検討用水平動 6mm
- ② 炉心上部機構の地震以外の変位（マニプレータ式燃料交換機の製作および据付け誤差、アーム旋回制御系の停止誤差）^{注1)}：0mm

注1) 製作および据付け誤差は試運転時の調整、アーム旋回制御系の誤差は炉心へのアクセス前に位置決めピンを挿入することにより、アーム面外方向のアーム変位を 0mm としたが、現実的には、以下のアーム変位が発生する恐れを有している。

- ・製作および据付け誤差：2mm
- ・アーム旋回制御系の停止誤差：2.1mm（実証炉でのマニプレータ式燃料交換機でのデータをもとにアーム長を補正）

(3) 解析モデル

アーム変位の解析検討に使用した梁モデルを図 3.1.2-2 に示す。各駆動部には、ギャップのガタが存在するため、耐震解析結果に、別途計算したギャップのガタによる変位を加算した。

(4) 解析結果

アーム変位の解析検討結果を表 3.1.2-1 に示す。いずれのケースもギャップのガタによる変位が最大である。S₁および S₂地震時には、アームと炉心上部機構間に隙間（片側隙間は、S₁地震で 7.3mm、S₂地震で 4.7mm）が存在する。一方、強地震検討用水平動では、アーム曲げ変位が増加して、炉心上部機構と衝突する。ただし、軸受に従来想定していたころ軸受に代えて、ガタなしの玉軸受けを採用することにより、強地震においても干渉を回避することが可能である。

(5) まとめ

燃料交換機の耐震解析を行い、切込み部内をアームが伸縮するが、グリップユニット廻りの配置変更や、アーム剛性向上などの設計対応により、炉心上部機構との衝突を回避できる見通しを明らかにした。軸受についてはガタなしの玉軸受けを採用する必要があるため今後要素試験により軸受耐久性を確認する必要がある。

表 3.1.2-1 マニプレーター式燃料交換機アーム変位の解析検討

項目	S ₁ 地震	S ₂ 地震	強地震検討用水平動
燃料交換機側	グリッパユニット幅	289.0mm	289.0mm
	地震によるアーム曲げ ¹⁾	5.7mm	10.9mm
	ギャップガタによる変位 ¹⁾	15.7mm	15.7mm
	経年変化など ¹⁾	3.8mm	3.8mm
	合計	339.4mm	349.8mm
炉心上部機構側	切込み幅 ¹⁾	360.0mm	360.0mm
	地震変位 ²⁾	3.0mm	6.0mm
	合計	354.0mm	348.0mm
衝突の有無 ³⁾	○	○	×(グリッパユニット下端縮径等により衝突しない可能性有り)

注1) 炉心上部機構のうち、炉心計装取付板での切り込み幅。ただし、原子炉構造側では、最終的には350mmと設定しており、今後の調整必要

注2) 片側変位

注3) 炉心上部機構側合計値 > 燃料交換機側合計値の条件で○

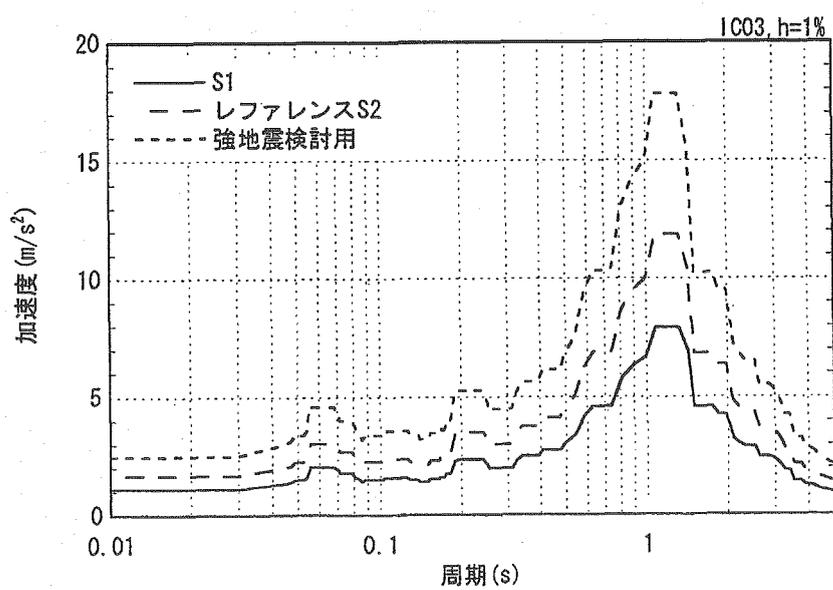


図 3.1.2-1 燃料交換機耐震性評価解析条件 (床応答曲線)

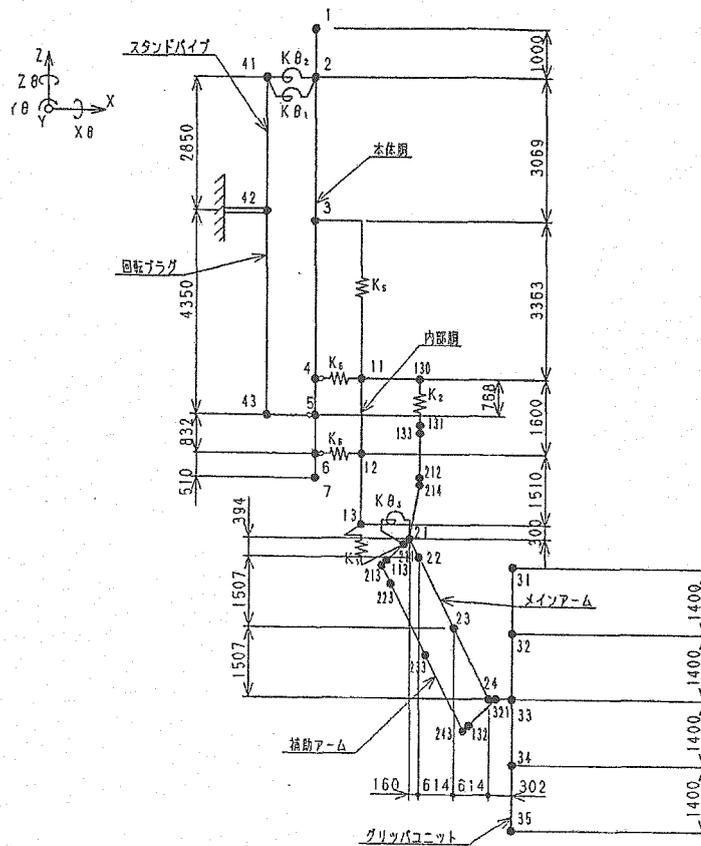


図 3.1.2-2 燃料交換機耐震性評価解析条件（解析モデル）

3.1.3 ユニバーサルジョイント寿命評価

(1) 概要

複数体移送を前提とした固定ラック式炉内中継装置を採用した場合、燃料交換機のグリッパ昇降回数が大幅に増加し、燃料交換機のユニバーサルジョイント寿命が懸念される。ここでは複数体移送を前提とした固定ラック式炉内中継装置を採用した場合の燃料交換機ユニバーサルジョイント寿命への影響評価を行った。

(2) 検討条件

ユニバーサルジョイント寿命制限については過去に実施された試験結果[2]を用いて外挿評価した。ただし、燃料集合体重量は現状では集合体の詳細構造が未定のため、暫定的に試験時に想定された値である 450kg/体を用いて検討した。検討条件を以下に示す。

- ・燃料交換機型式 : マニプレータ式
- ・炉内中継装置型式 : 固定ラック式
- ・移送方式 : 複数体移送方式
- ・燃料交換時取扱体数 : 使用済燃料 84 体、制御棒 28 体 (1 モジュール分)
- ・燃料交換時期の想定 : 4 モジュール連続
- ・集合体重量 : 450kg/体
- ・引抜荷重 : 2.5ton
- ・燃料交換機アーム長 : 1.69m
- ・グリッパ昇降ストローク : 4500mm
- ・グリッパ昇降速度 : 6m/min

(3) 検討結果

炉内の燃料輸送経路を単体移送の回転ラック式と複数体移送の固定ラック式それぞれ図 3.1.3-1、図 3.1.3-2 に示す。燃料 1 体あたりのグリッパ昇降回数は単体移送 6 回、複数体移送 8 回、アームスイングは単体移送 3 回、複数体移送 9 回と、複数体移送においてユニバーサルジョイント寿命への影響が懸念される。燃料交換機の運転条件を表 3.1.3-1 に示す。ナトリウム冷却中型炉では高内部転換型炉心を想定しているため燃料交換本数が低減され、1 燃交当たりのユニバーサルジョイントとの回転数で比較すると 1.2 倍程度となる。また、負荷荷重の大きい炉心部での昇降回数は低減するため、ユニバーサルジョイントの平均トルクは 3.18kgfm と試験時の運転条件である 3.74kgfm より小さく、寿命の確保に有利であると考えられ、燃料交換 5 回程度はユニバーサルジョイント寿命確保が可能であると考えられる。

上記の検討は集合体 1 体当たりの重量が 450kg であることを前提としている。高内部転換型炉心においては集合体 1 体当たりの重量が 450kg 以上となる可能性がある。仮に集合体重量が 1.5 倍となった場合はユニバーサルジョイントにおける平均トルクは 3.88kgfm と

なり、試験時に想定された平均トルク 3.74kgfm を若干上回る。ただし、上記検討で想定されたユニバーサルジョイント寿命は十分余裕を持って定められているため（表 3.1.3-1 注参照）、本プラントで想定されている 4 モジュール連続の燃料交換に対応可能なユニバーサルジョイント寿命を確保可能であると考えられる。

(4) まとめ

複数体移送を前提とした燃料交換を実施したときのユニバーサルジョイントの寿命評価を行った。燃料集合体重量を 450kg/体とした場合は燃料交換 5 回程度の寿命確保が可能であることが明らかになった。高内部転換型炉心の燃料集合体の重量が 1.5 倍程度になることを想定して外挿した場合も 4 モジュール連続の燃料交換に対応可能なユニバーサルジョイント寿命を確保可能であると考えられる。ただし、試験条件ではグリッパユニットの昇降速度は 3m/min が仮定されているが、燃料交換機的设计条件としては 6m/min を選定しているため今後グリッパユニット高速化の影響を評価する必要がある。

注 1) 試験においては 3m/min 以下ではグリッパ昇降速度がユニバーサルジョイント寿命に影響を与えないことが確認されている。

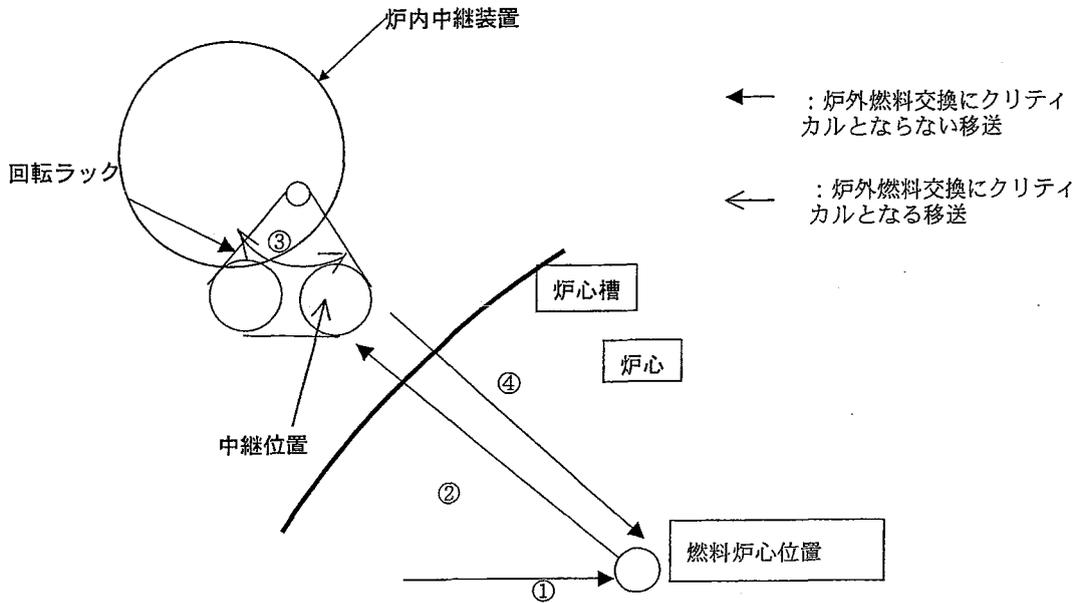
表3.1.3-1 マニプレータ式燃料交換機の運転条件

項目		単位	本検討 ¹⁾	文献値
燃料交換本数		本	112	175
炉内取扱位置	(1燃料交換)	箇所	8	4
燃料仕様	燃料対面間距離(パッド間)	mm	186.1	152.3
	燃料長	mm	4400	4600
燃料交換機仕様	アーム長さ(炉心中心側) ²⁾	mm	1690	1400
	グリッパ昇降速度	m/min	6	3
	挿入引抜力	ton	2.5	同左
	グリッパ偏心量	mm	25	同左
ユニバーサルジョイント関連	総回転数(1燃料交換)	回	208320	169750
	負荷トルク	kgfm	3.18	3.74
	寿命	取扱本数	575以上 (5.1燃交以上)	575 ³⁾ (3燃交相当)

注1)固定ラック式炉内中継装置を使用した複数体移送を対象

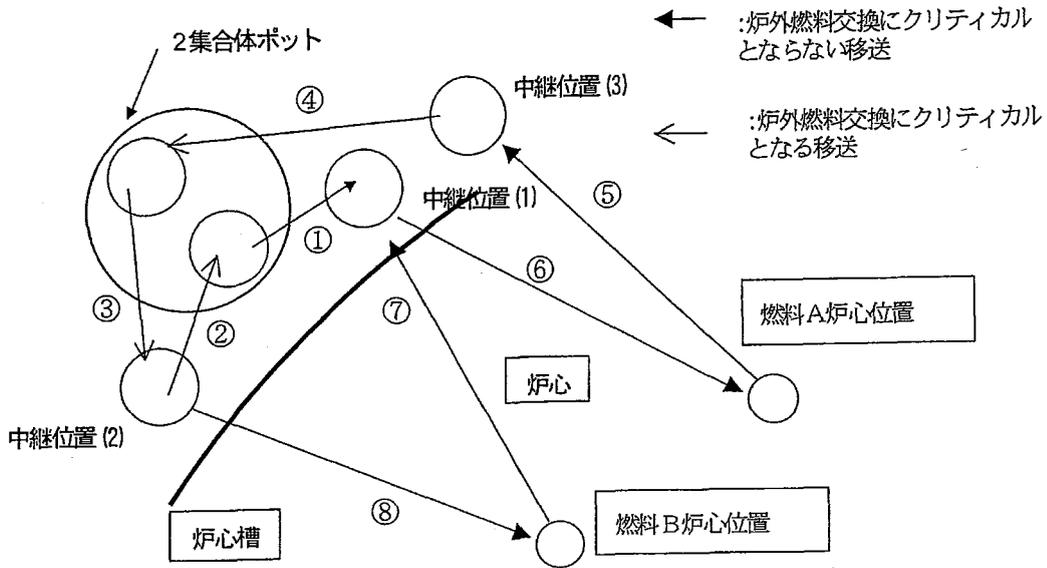
注2)実証炉はフェーズ2での数値。フェーズ1では1550mm

注3)試験では6燃交相当を確認、寿命としては保守的に半分を想定している。



- | |
|--|
| <p>①使用済燃料の引き抜き</p> <p>②使用済燃料の中継位置への移送</p> <p>(③回転ラックの回転: 燃料交換機は動作せず)</p> <p>④新燃料の炉心への移送</p> <p>→ 3回の移送</p> <p>移送毎にグリッパの上昇、下降を各2回行うため、グリッパ昇降は6回/1体燃料交換</p> <p>アームは炉心引き抜き時、中継位置、炉心装荷時の3箇所ですイング往復3回/体</p> |
|--|

図 3.1.3-1 炉内輸送経路 (回転ラック式)



- ①新燃料 A の中継位置への移送
 - ②使用済燃料 A の2集合体ポットへの移送
 - ③新燃料 B の中継位置への移送
 - ④使用済燃料 B の2集合体ポットへの移送
 - ⑤使用済燃料 A の中継位置への移送
 - ⑥新燃料 A の炉心位置への移送
 - ⑦使用済燃料 B の中継位置への移送
 - ⑧新燃料 B の炉心位置への移送
- 燃料2体交換に8回の移送
- 移送毎にグリッパの上昇、下降を各2回行うため、グリッパ昇降は8回/1体燃料交換
- アームスイングは往復9回スイング相当

図 3.1.3-2 炉内輸送経路 (固定ラック式)

3.2 炉内中継装置

3.2.1 構造概念検討

(1) 概要

固定ラック式炉内中継装置は、燃料交換機・燃料出入機間で、新燃料、使用済燃料の受渡しを行う機器である。平成 14 年度までの検討で、大径の複数体ポットを利用して、複数体の燃料を同時に移送することにより、稼働率の向上を目指す案が提案された。本年度は複数体移送の場合の固定ラック式の炉内中継装置を具体化して単体移送の場合の回転ラック式の炉内中継槽と比較評価した。また、固定ラック式炉内中継装置の技術課題次項以降における検討項目として摘出した。

(2) 複数体ポット

複数体ポットに係る除熱評価[5]をもとに、発熱量 22.5kW の燃料を 2 体収納可能な複数体ポット形状を検討した。ただし、上記の除熱評価は、平成 15 年度検討のナトリウム冷却中型炉と燃料形状が相違し、かつ、二次元流動解析をベースとしているため、今後、最終的な燃料条件で多次元流動解析を行い、除熱性能を確認する必要がある。

複数体ポットの概念図を図 3.2.1-1 に示す。主要仕様は、以下のとおりである。

- ① 燃料収納本数：2 体
- ② ポット径
 - ・胴本体（フィン先端部/フィン付け根部）：φ 580mm/φ 560mm
 - ・ハンドリングヘッド部：φ 640mm
- ③ ポット長
 - ・全長：φ 4690mm
 - ・初期ナトリウム液面位置：燃料上端から下方に 450mm
- ④ フィン仕様
 - ・フィン形状：縦型フィン
 - ・フィン数：145 枚（フィン幅 3mm、フィンピッチ 12mm）

複数体ポットのコンパクト化をねらって、ポット表面に削り出しによりフィンを加工した。ポット表面の目視検査を実施する計画であるが、フィン廻りには溶接部が存在しないため、法令上、表面検査及び体積検査は要求されず、ISI に係る技術課題はない。ただし、ポット表面へのフィン加工は前例がないため、以下の技術課題を解決する必要がある。

- ・製作性：フィンの削出し加工による製作誤差、フィン付け根部などでの放射率向上処理の作業性
- ・除熱性：フィン表面での自然対流及び放射伝熱特性

また、燃料吊上げ時には、ポット頂部のサイホンによりナトリウムが汲み出されるため、燃料頂部が露出した状態となる。通常移送時には、原子炉容器から EVST までの燃料移送時間は約 20 分と短いため、燃料頂部が露出した状態で移送される。一方、移送停止時には、

空気間接冷却系が起動（収納筒外面冷却）するとともに、ナトリウム液面が上昇し、燃料頂部を越えて、最終的にナトリウムポット内で一巡の伝熱パスを形成し、所定の除熱性能を確保する。

(3) 炉内中継装置

固定ラック式炉内中継装置は、支持構造体（ルーフデッキ上に設置）、炉内案内管、炉内中継槽から構成される。固定ラック式炉内中継装置の主要仕様を表 3.2.1-1、構造概念図を図 3.2.1-2 に示す。表中、回転ラック式炉内中継装置の主要仕様（平成 14 年度成果の見直し）も記載した。

複数体ポットは、燃料出入機により吊り下げられた状態で、炉内案内管中を昇降する。昇降停止時の冷却性を確保するために、炉内案内管周囲（冷却スリーブ）を冷却する空気間接冷却系^{注 1}を設置した。炉内案内管周囲の空気間接冷却系の系統構成を図 3.2.1-3 に示す。

炉内案内管には、燃料交換機がアクセス可能なように図 3.2.1-4、図 3.2.1-5 に示す切欠きを設ける必要がある。炉内中継槽との変位抑制や、構造健全性を確保するために、炉内案内管下端は、炉内中継槽上部に差込む構造を採用した。

注 1) 燃料交換時には、空気冷却系の圧力が高く、万一の冷却スリーブ破損時には、原子炉容器中に空気が漏えいする恐れを有している。ただし、原子炉運転中でなく、安全上の課題がないことや、昇降停止時にのみ起動することなどを考慮して、窒素ガスでなく、空気を使用した。

(4) 課題検討

固定ラック式炉内中継装置の技術課題に関する検討内容を以下にまとめる。

(a) 燃料交換機ユニバーサルジョイント寿命

複数体移送の採用により、燃料 1 体あたりの燃料交換機グリップ昇降回数が 2 倍となるが、3.1.3 項に記載したように、高内部転換型炉心では、負荷荷重の大きい炉心部での昇降回数は低減するため、ユニバーサルジョイントの平均トルクは小さく、ユニバーサルジョイント寿命を確保可能な見通しとなった。

(b) 炉内中継装置本体（炉内案内管）の構造健全性

炉内中継装置本体は燃料交換機アクセス用の切欠きを有するため構造健全性が懸念される。炉内中継装置の炉内案内管について、S₂地震時の構造健全性を 3.2.2 項において評価する。

(c) 原子炉構造との配置整合性

固定ラック式炉内中継装置は、動的な駆動機構を設置しないが、大径の複数体ポットの採用に伴い、各部の形状が増加する傾向を有するため、原子炉構造との配置整合性を 3.2.3 項において確認する。

(5) まとめ

複数体移送の場合の固定ラック式の炉内中継装置を具体化を行った。固定ラック式炉内中継装置の技術課題として「燃料交換機ユニバーサルジョイント寿命」、「炉内中継装置本体の構造健全性」、「原子炉構造との配置整合性」を重点検討項目として抽出した。「燃料交換機ユニバーサルジョイント寿命」は3.1.3項において検討した結果成立する見通しがえられた。炉内中継装置本体の構造健全性、「原子炉構造との配置整合性」はそれぞれ3.2.2項、3.2.3項で検討する。

表3. 2. 1-1 炉内中継槽基本仕様

項目	単位	複数体移送	1体移送 ¹⁾	
型式	-	固定ラック式	回転ラック式	
設置位置	-	ルーフデッキ上	同左	
基数 ²⁾	基	4	4(内部の動的機器はモジュール共通)	
最高使用圧力	MPa	0.1/0.1(内圧/外圧)	同左	
最高使用温度(炉内)	°C	570(常設化)	250(原子炉運転中は取外し)	
機器種別	-	第3種機器	同左	
耐震クラス	-	案内管:A(S ₂) ²⁾	案内管:A(S ₂) ³⁾ 回転ラック:B(S ₂) ⁴⁾	
主要材料	-	SUS304	同左	
主要寸法	ポット寸法	mm	φ580(フィン先端)/φ560(フィン付け根)×4690	φ355×4630
	回転ラック半径	mm	-	355
	燃料通過管径	mm	-	φ415
	中心位置	mm	(炉心から3715) ⁵⁾	炉心から3785
	炉内案内管径	mm	φ670	φ850
	中心位置	mm	炉心から3715	炉心から3700
	上部案内管径	mm	φ966	φ1260 ⁶⁾
	中心位置	mm	炉心から3715	炉心から3700
雰囲気	-	ナトリウム、アルゴンガス	同左	
取扱対象	取扱対象物	-	炉心燃料、制御棒、遮へい体	同左
	取扱容量	本/回	ポット内:2 炉内中継装置内:2	ポット内:1 炉内中継装置内:2

注1)平成14年度成果をもとに、燃料形状、崩壊熱などの変更を反映

注2)固定部は、各モジュールに設置

注3)(S₂)はカバーガスパウンダリの維持

注4)(S₂)は燃料落下の防止

注5)燃料通過管はなく、炉内案内管内を燃料通過

注6)燃料通過管と上部案内管の偏心配置を利用して、上部案内管の隙間に挿入遮へい体を設置

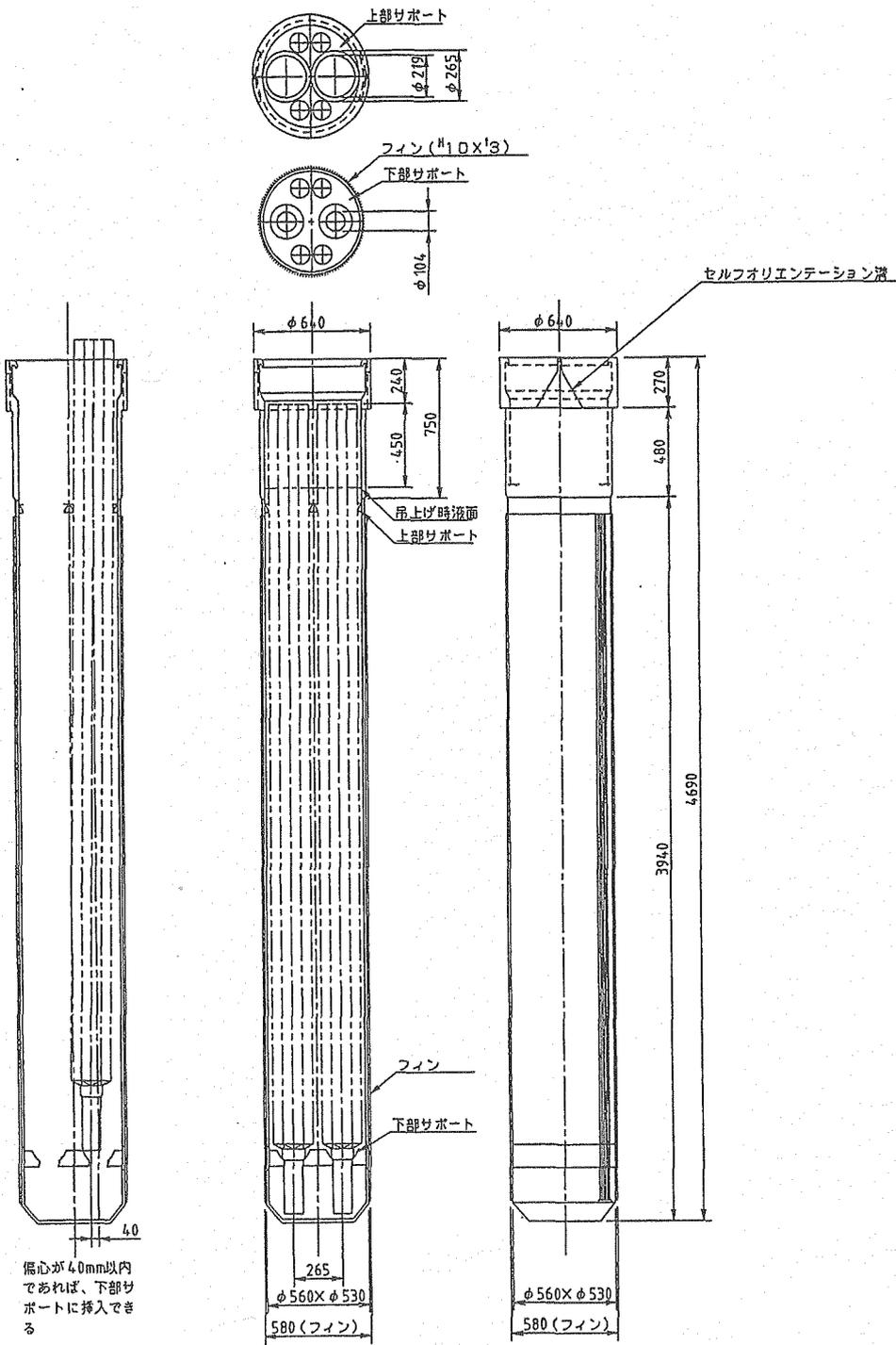


図 3.2.1-1 複数体ポット概念図

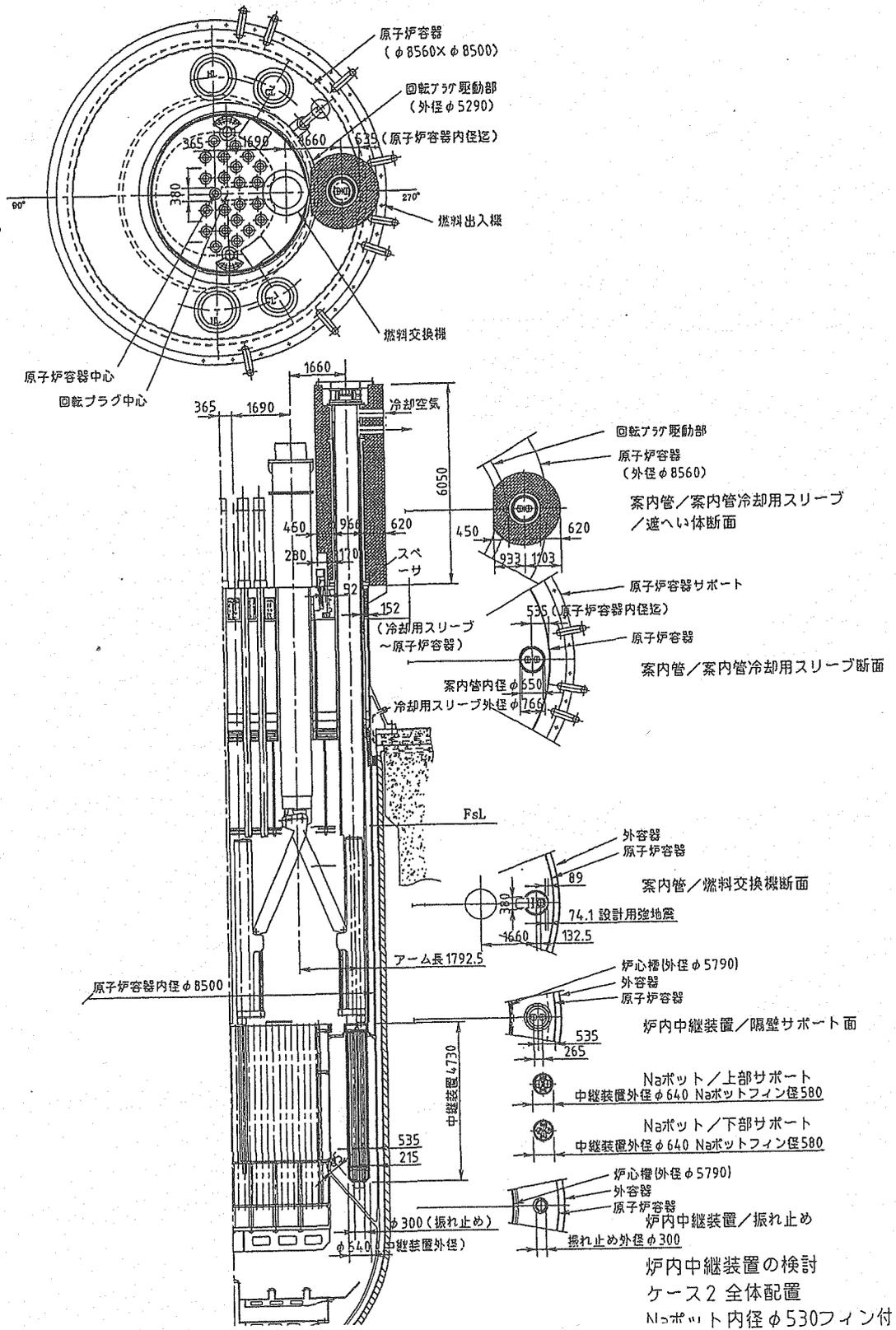
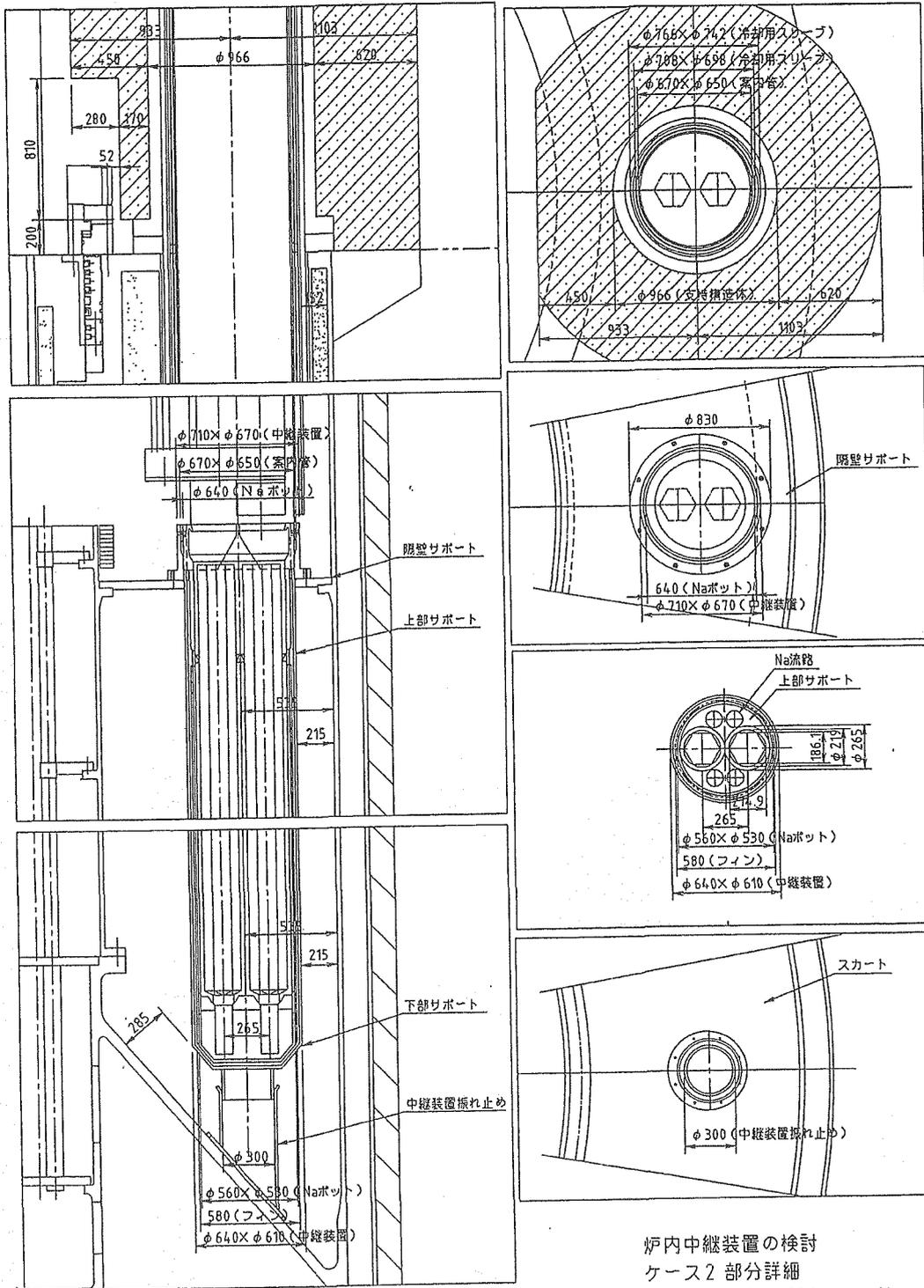


図 3.2.1-2 (1/2) 固定ラック式炉内中継装置概念図



炉内中継装置の検討
 ケース2 部分詳細
 Naポット内径 $\phi 530$ フィン付

図 3. 2. 1-2 (2/2) 固定ラック式炉内中継装置概念図

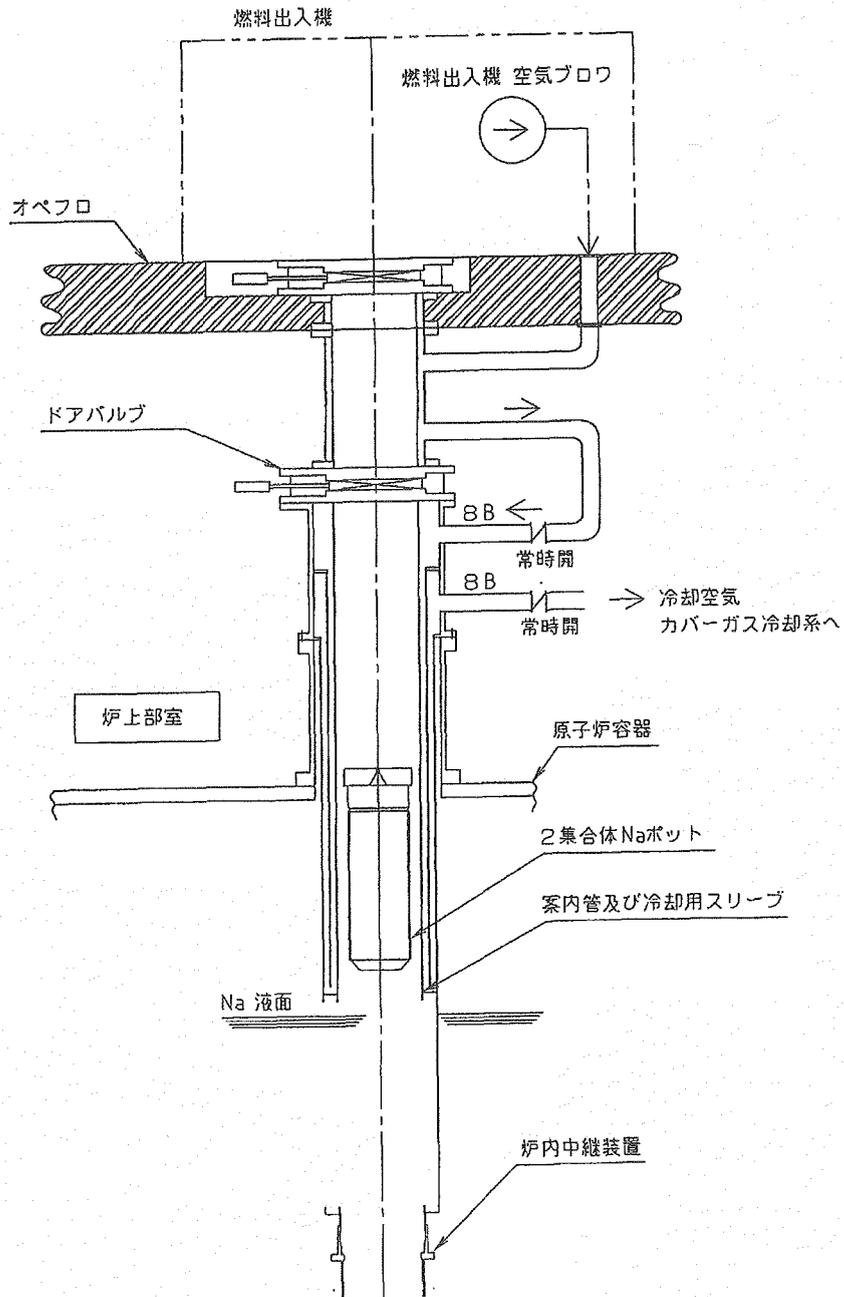


図 3.2.1-3 炉内中継装置案内管間接冷却系系統図

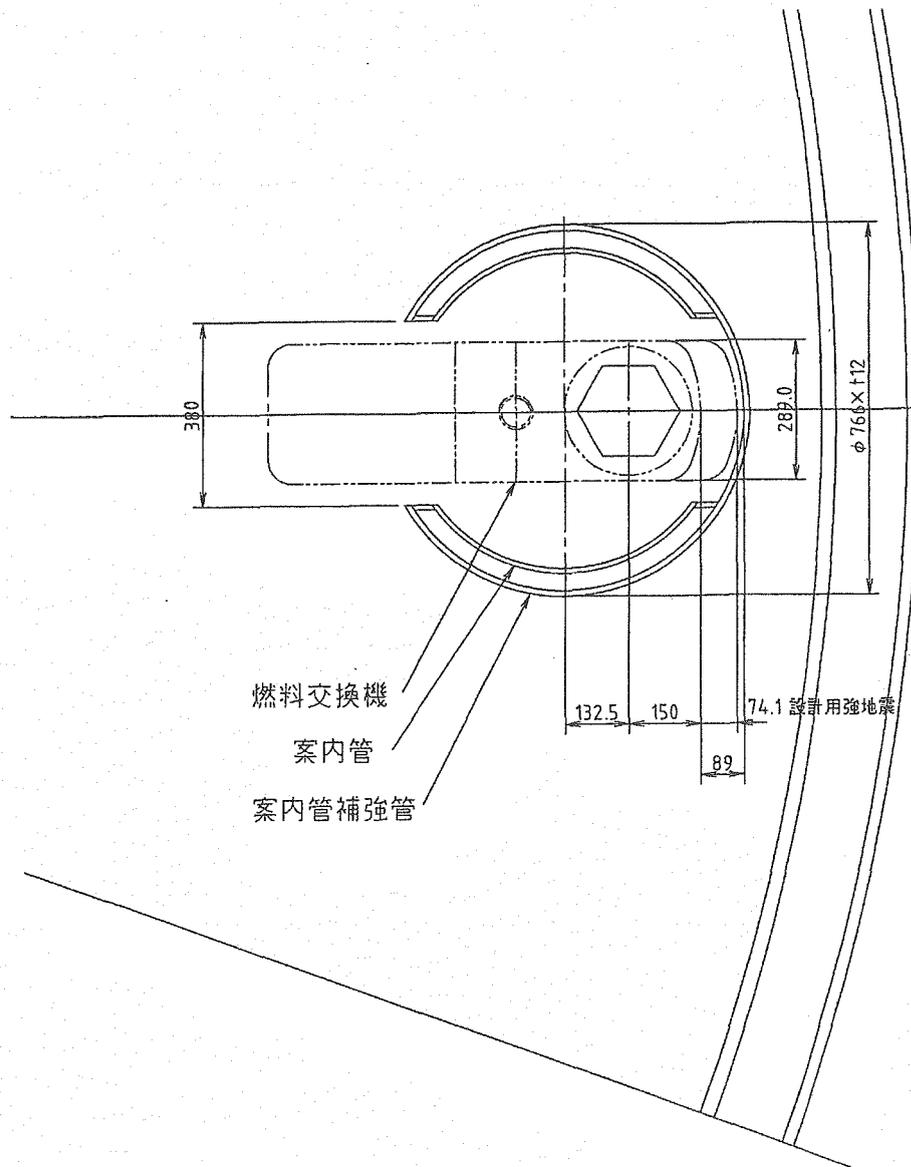


図 3. 2. 1-4 炉内中継装置案内管切欠き部概念図 (平面図)

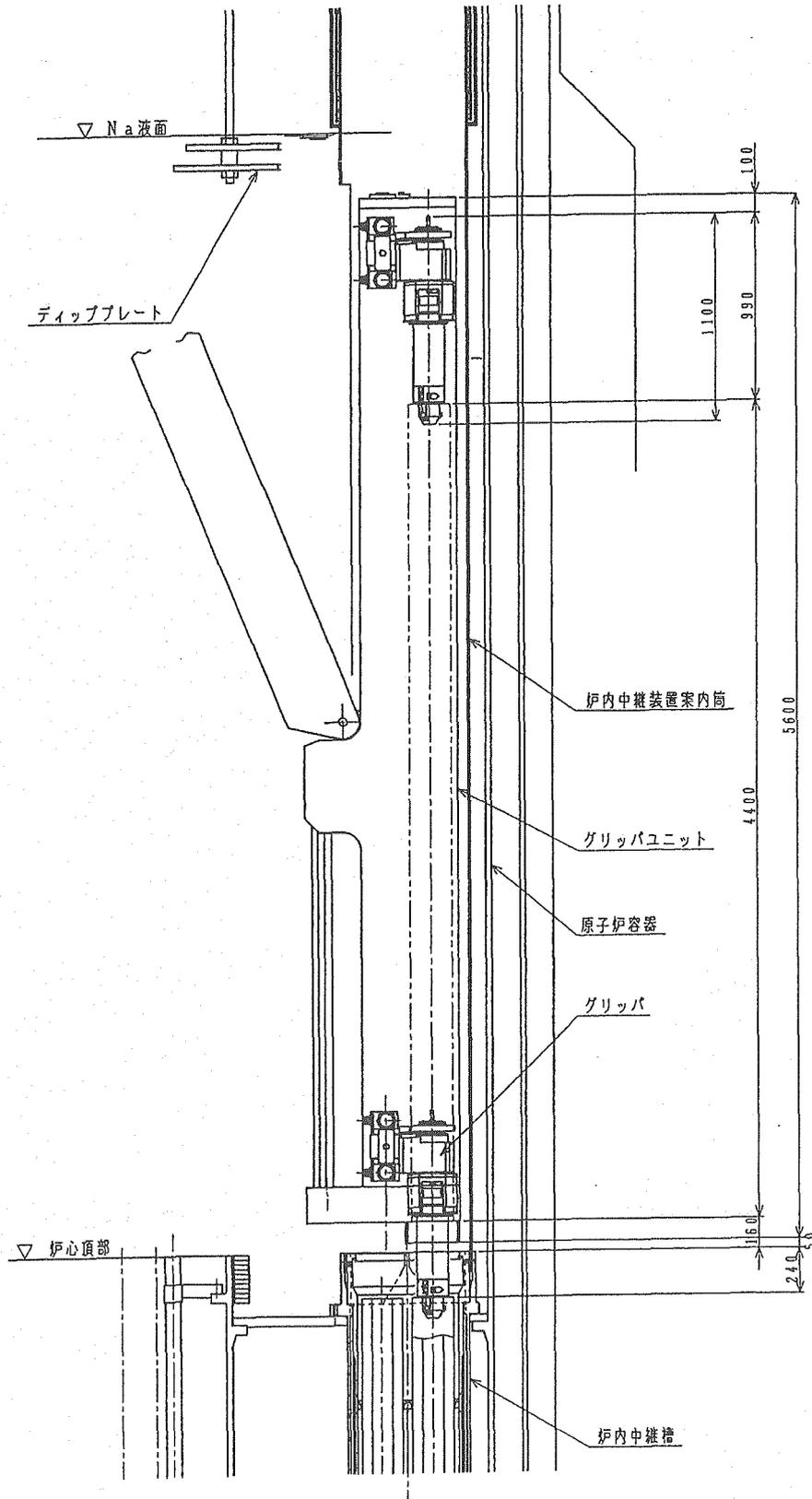


図 3.2.1-5 炉内中継装置案内管切欠き部概念図 (立面図)

3.2.2 耐震性評価

(1) 概要

固定ラック式炉内中継装置においては炉内案内管直下に燃料交換機がアクセスする必要があるため、炉内案内管の一部を切欠き燃料交換機進入経路を確保する必要がある。このため切欠きが炉内案内管の耐震性に及ぼす影響を評価した。

(2) 検討条件

炉内案内管は原子炉容器上部から吊り下げられ水平方向については下端で支持されている。計算体系を図 3.2.2-1、評価に用いた単純梁モデルを図 3.2.2-2 に示す。ナトリウム中 (AB 間) については案内管外部に設けられた補強管、カバーガス中に相当する部分 (BC 間) ではポットの間接冷却のための冷却管を含めてモデル化した。炉上部室の床応答曲線としては図 3.2.2-3 を想定した。また各部の重量としては以下の概略評価を用いた。

(AB 間)

案内管+補強管+ナトリウム=164.4+225.4+402.1=791.9kg/m

総重量=791.9kg/m×0.603m=4780kg

(BC 間)

案内管+冷却管=164.4+312.9=477.3kg/m

総重量=477.3kg/m×0.717=3420kg

(3) 検討結果

(a) 分配係数

AB 間の剛度 (断面 2 次モーメント/長さ) を標準剛度として BC 間の剛比 (剛度/標準剛度) および回転角を評価した結果を以下に示す。

項目	記号	単位	AB 間	BC 間
長さ	L	cm	603	717
単位重量	w	t/cm	0.00792	0.00477
断面 2 次モーメント	I	cm ⁴	129746	383199
剛度	K	cm ³	215.2	534.4
剛比	k	-	1	2.48
回転角	R	-	1	-0.84

このとき各部分の分配係数は以下により表される。

$$DF_{AB} = \frac{k_{AB}}{k_{AB} + k_{BC}} = \frac{1}{1 + 2.48} = 0.29$$

$$DF_{BC} = \frac{k_{BC}}{k_{AB} + k_{BC}} = \frac{2.48}{1 + 2.48} = 0.71$$

(b) 固有振動数

炉内案内管の固有振動数については単位荷重 P が負荷された時の仮想変位から単振動モデルを用いて概略評価した。仮想変位によるモーメント \bar{M} は以下の式から求められる。

$$\left(\sum_i M_i R_i \right) X + PL_{AB} = 0$$

$$X = -\frac{603}{-242} = 2.49$$

$$\bar{M} = M_{AB} X = -131 \times 2.49 = -328 \text{ kN/cm}$$

このときの部材の変位量は以下の式で求められる。

$$\delta = \int (\bar{M}M / EI) dx = \frac{5}{12} \frac{\bar{M}M_{\max} L_{AB}}{EI_{AB}} + \frac{5}{12} \frac{\bar{M}M_{\max} L_{BC}}{EI_{BC}} = 0.64 \text{ cm}$$

単振動モデルを用いて固有振動数は以下のように評価される。

$$f = \frac{5}{\delta^{0.5}} = 6.3 \text{ Hz}$$

(c) 自重を水平荷重とした場合

荷重が自重により均等に付加された場合の固定端曲げモーメント H は以下の式で表される。

$$H_{AB} = \frac{1}{8} w_{AB} L_{AB}^2 = 0.00792 \times 9.8 \times 603^2 \div 8 = 3527 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$H_{BC} = \frac{1}{8} w_{BC} L_{BC}^2 = -0.00477 \times 9.8 \times 717^2 \div 8 = -3006 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

一方、モーメント分配 J は以下の式で表される。

$$J_{AB} = -(H_{AB} + H_{BC}) DF_{AB} = -150 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$J_{BC} = -(H_{AB} + H_{BC}) DF_{BC} = -372 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

つりあいモーメントの合計 m は以下で表される。

$$\begin{aligned} m_{AB} &= H_{AB} + J_{AB} = 3527 - 150 = 3378 \text{ kN} \cdot \text{cm} \\ m_{BC} &= H_{BC} + J_{BC} = -3006 - 372 = -3378 \text{ kN} \cdot \text{cm} \end{aligned}$$

モーメントによる仕事は $\sum mR$ は以下で表される。

$$\sum mR = 1 \times 3378 - 0.84 \times (-3378) = 6218 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

また、分布荷重の合力による仕事 PC は以下で表される。

$$PC = \frac{1}{2} P_{AB} L_{AB} + \frac{1}{2} P_{BC} L_{AB} = 4.78 \times 9.8 \times 603 \div 2 + 3.42 \times 9.8 \times 603 \div 2 = 24222 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

仮想仕事の原理から最大発生モーメント M_{\max} は以下のように求められる。

$$\sum MR \cdot X + \sum mR + PC = 0$$

$$X = -\frac{\sum mR + PC}{\sum MR} = -\frac{6218 + 24222}{-242} = 126$$

$$MX = -131 \times 126 = -16534 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$M_{\max} = MX + \sum m = -16534 + 3378 = -13157 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

(d) 水平地震荷重による応力

案内管の固有振動数を 6.3Hz 程度とすると図 3.2.2-3 の床応答曲線より水平加速度は保守的に 4m/sec^2 、水平震度 C_H は以下の式から 0.4G と評価される。

$$C_H = \frac{\text{地震加速度}}{\text{重力加速度}} = \frac{4}{9.8} = 0.4$$

この時の発生応力 σ_H は以下の式で表される。

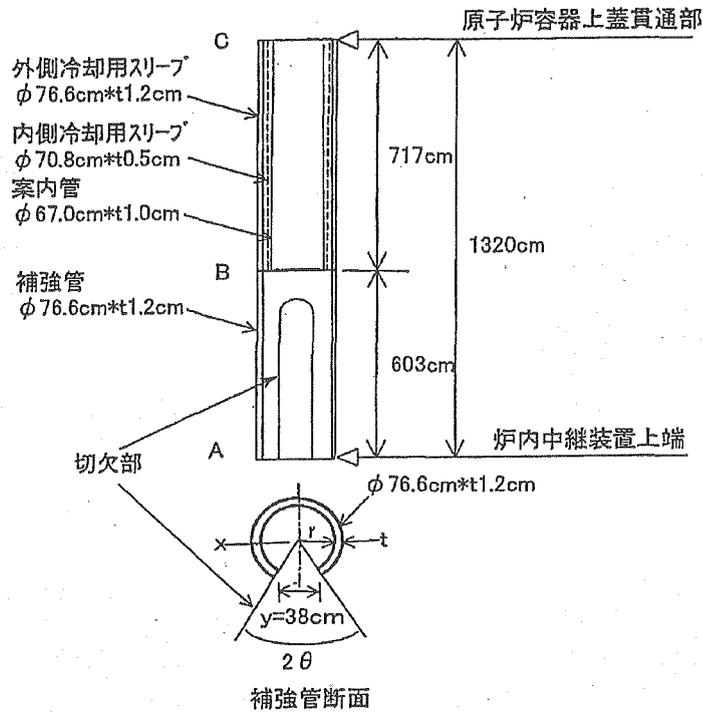
$$\sigma = \frac{C_H M_{\max}}{Z_x} = \frac{0.4 \times 13157 \text{ kN} \cdot \text{cm}}{3442 \text{ cm}^3} = 1.5 \text{ kN/cm}^2 = 15 \text{ N/mm}^2$$

炉内案内管の最大曲げ応力は冷却スリーブ下端で 15N/mm²と、400℃における SUS304 の許容応力 160N/mm²よりも小さく、構造健全性を確保可能な見通しである。

(4) まとめ

燃料交換機アクセス用の切欠きを有する炉内中継装置の炉内案内管について、S₂地震時の構造健全性を評価した。炉内案内管の最大曲げ応力は冷却スリーブ下端で 15N/mm²と、400℃における SUS304 の許容応力 160N/mm²よりも小さく、構造健全性を確保可能な見通しである。

- ・案内管は原子炉容器上蓋貫通部のスパーサで支持され、炉内中継装置の上端に摺動するように差し込まれ支持される。
- ・案内管の内、サポート間隔が長い原子炉容器上蓋部から炉内中継装置までの間を単純梁モデルで計算する。
- ・案内管の上部は、外側に冷却用スリーブがあり、一方下部は燃料集合体の出入れの為の切欠があり、それぞれ剛性が異なるので、2部材からなる梁として計算する。



[A-B間]

案内管は、両側に切欠があるので重量のみ考慮し、片側に切欠のある補強管を強度部材とする。補強管の断面性能は、

	$\theta = \sin^{-1}((38/2)/(76.6/2)) =$	29.741°
切欠開口角度:	$2\theta =$	59.482°
切欠巾:	$y =$	38 cm
半径:	$r = 74.2/2 =$	37.1 cm
肉厚:	$t =$	1.2 cm
平均径:	$D_m = (76.6 + 74.2)/2 =$	75.4 cm
断面2次モーメント:	$I_{AB} = I_x = r^3 \cdot t \cdot (\pi - y/r) =$	129746 cm ⁴
断面係数:	$Z_{AB} = I_x / (D_m/2) =$	3442 cm ³

[B-C間]

断面性能は、案内管及び冷却用スリーブの合計で求める。

①外側冷却用スリーブ外径	$D_{1o} =$	76.6 cm
肉厚	$t_1 =$	1.2 cm
断面2次モーメント	$I = \pi \cdot (D_{1o}^4 - (D_{1o} - 2 \cdot t_1)^4) / 64 =$	202053 cm ⁴
②内側冷却用スリーブ外径	$D_{2o} =$	70.8 cm
肉厚	$t_2 =$	0.5 cm
断面2次モーメント	$I = \pi \cdot (D_{2o}^4 - (D_{2o} - 2 \cdot t_2)^4) / 64 =$	68221 cm ⁴
③案内管外径	$D_{3o} =$	67.0 cm
肉厚	$t_3 =$	1.0 cm
断面2次モーメント	$I = \pi \cdot (D_{3o}^4 - (D_{3o} - 2 \cdot t_3)^4) / 64 =$	112925 cm ⁴
合計	$I_{BC} =$	383199 cm ⁴

図 3. 2. 2-1 炉内案内管耐震性評価 (計算体系)

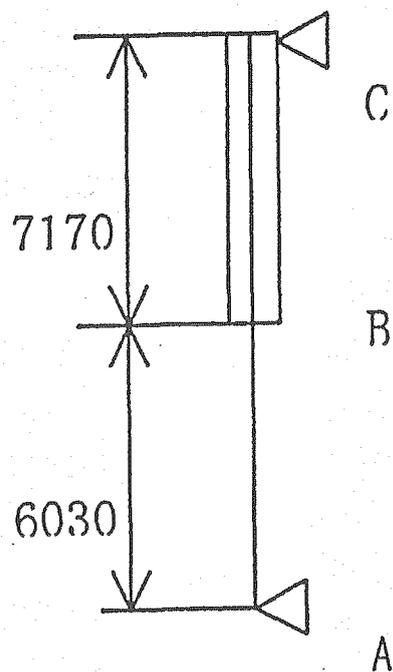
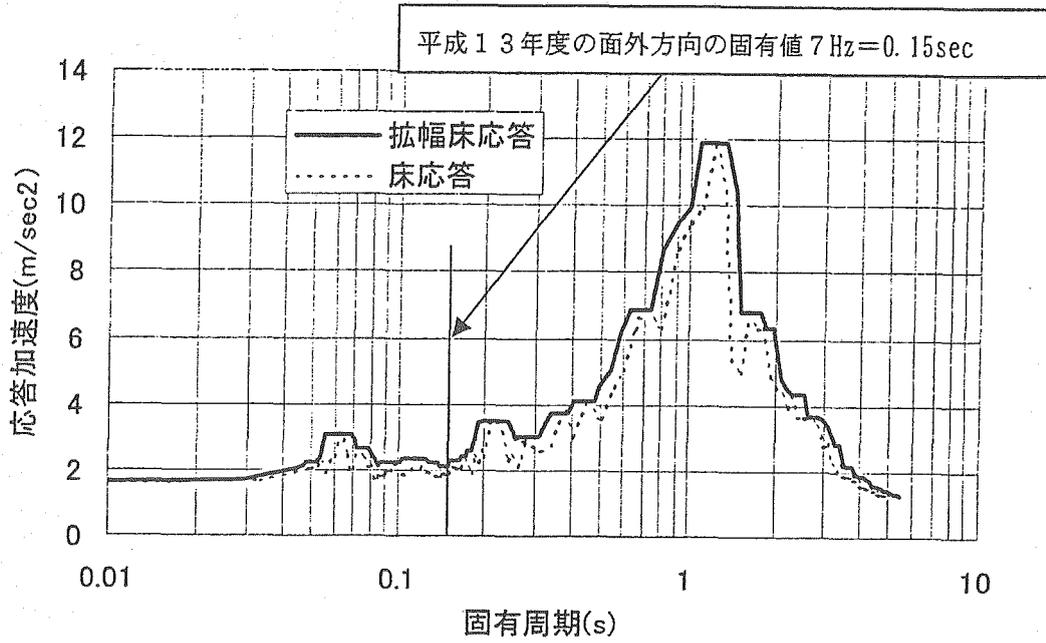
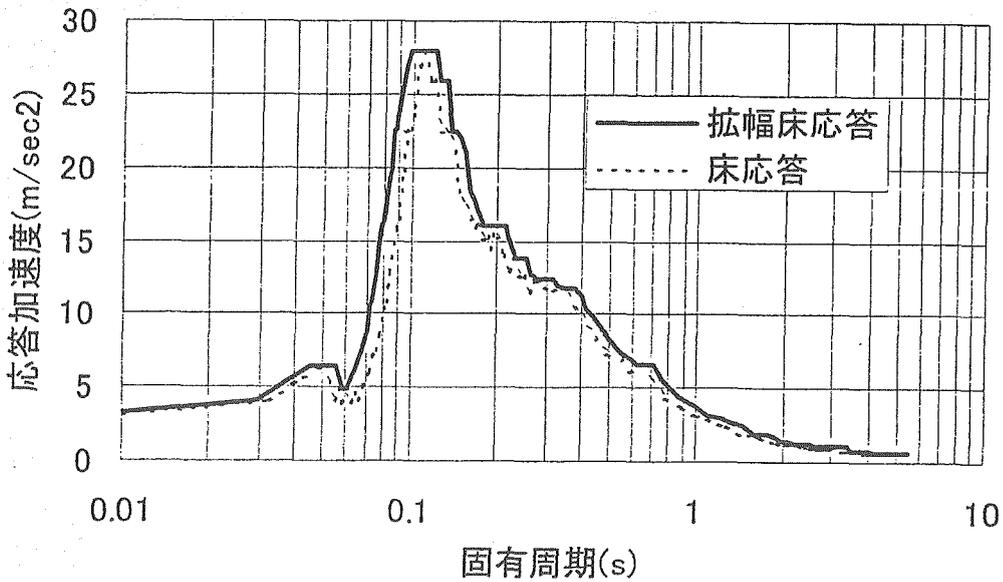


図 3.2.2-2 炉内案内管耐震性評価（単純梁モデル）



(1) 設計用床応答スペクトル(水平方向、減衰定数 1.0%)



(2) 設計用床応答スペクトル(上下方向、減衰定数 1.0%)

図 3.2.2-3 炉内案内管耐震性評価 (床応答曲線)

3.2.3 配置整合性評価

(1) 概要

複数体移送方式を前提とした固定ラック式の炉内中継装置を採用した場合、2 集合体ポットを取扱うため機器の寸法が増加する。ここでは遮へい配置等を工夫することにより、原子炉容器寸法に影響なく炉内中継装置の配置が可能か検討を行った。

(2) 隙間評価

主要な部位における原子炉構造（平成 14 年度）との隙間を評価した。放射性物質の輸送基準（表面：2mSv/h 以下、1m 離れた位置：0.1mSv/h 以下）を満足する炉上部での必要遮へい厚さは、690mm（支持構造体厚さで 620mm 相当）と暫定した。以下では固定ラック式炉内中継装置と原子炉構造の隙間を評価した。

(a) 炉内外側

① 炉内中継槽上端と原子炉容器（炉心槽高さレベル）

- ・ 炉内中継槽上端外面 = 燃料出入孔位置+炉内中継槽上端での半径
= 原子炉容器中心より $3715\text{mm} + \phi 710\text{mm}/2$
= 原子炉容器中心より 4070mm

- ・ 原子炉容器内面 = 原子炉容器中心より 4250mm

- ・ 隙間 = $4250\text{mm} - 4070\text{mm} = 180\text{mm}$

② 炉内案内管（冷却スリブ）と原子炉容器

- ・ 炉内案内管（冷却スリブ）外面 = 燃料出入孔位置+炉内案内管半径
= 原子炉容器中心より $3715\text{mm} + \phi 766\text{mm}/2$
= 原子炉容器中心より 4098mm

- ・ 原子炉容器内面 = 原子炉容器中心より 4250mm

- ・ 隙間 = $4250\text{mm} - 4098\text{mm} = 152\text{mm}$

(b) 炉上部外側（ルーフデッキ上面）

- ・ 支持構造体外面 = 燃料出入孔位置+上部案内筒半径+必要遮へい厚さ
= 原子炉容器中心より $3715\text{mm} + \phi 966\text{mm}/2 + 620\text{mm}$ ^{注1)}
= 原子炉容器中心より 4818mm

- ・ ルーフデッキ外面（原子炉容器外面） = $\phi 8560\text{mm}/2$
= 原子炉容器中心から 4280mm

- ・ 隙間 = $4280\text{mm} - 4818\text{mm} = -538\text{mm}$

注 1) 必要遮へい厚さ 690mm のうち、70mm は構造体、620mm を遮へい部で対応

(c) 炉上部中心側（ルーフデッキ上面）

① 支持構造体（上部案内筒の遮へい部）と回転プラグ駆動部

- ・ 支持構造体外面 = 燃料出入孔位置+上部案内筒半径+必要遮へい厚さ
= 原子炉容器中心より $3715\text{mm} + \phi 966\text{mm}/2 + 620\text{mm}$

= 原子炉容器中心より 2612mm

- ・ 回転プラグ駆動部外面 = 回転プラグ駆動部半径+偏心量
= $\phi 5290\text{mm} + 365\text{mm}$
= 原子炉容器中心より 3010mm

- ・ 隙間 = $2612\text{mm} - 3010\text{mm} = -398\text{mm}$

② 支持構造体（上部案内筒の遮へい部）と燃料交換機

- ・ 支持構造体外面 = 原子炉容器中心より 2612mm ((1)と同じ)
- ・ 燃料交換機フランジ外面 = 燃料交換機据付位置+フランジ半径
= 原子炉容器中心より $2055\text{mm} + \phi 1200\text{mm}/2$
= 原子炉容器中心より 2655mm
- ・ 隙間 = $2612\text{mm} - 2655\text{mm} = -43\text{mm}$

(3) 整合性評価

(2)で評価した隙間が配置の制限目安と整合していることを以下で確認した。

(炉内外側)

- ・ 炉内中継槽上端と原子炉容器：180mm (制限目安 120mm 以上)
- ・ 炉内案内管（冷却スリーブ）と原子炉容器：152mm (制限目安 150mm 以上)

(炉上部外側)

- ・ 支持構造体（遮へい体）とルフデッキ端：-538mm (制限目安 0mm)

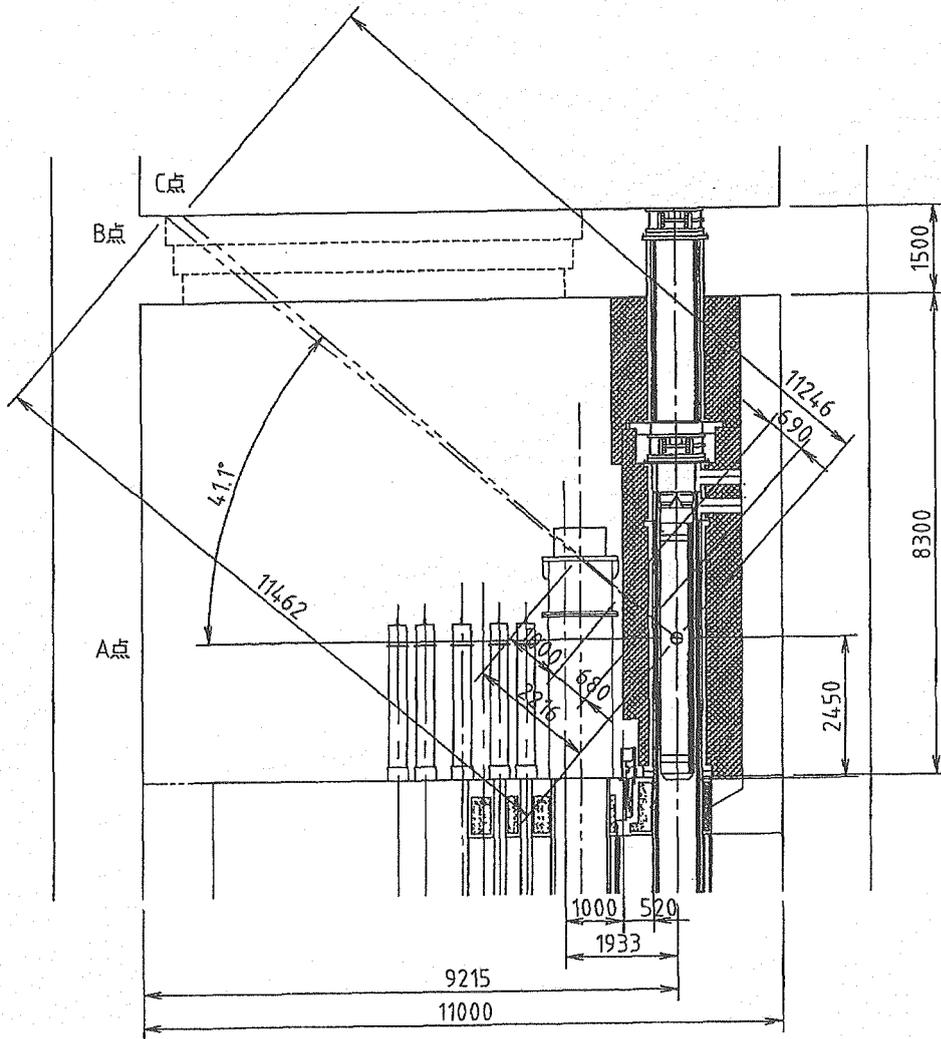
(炉上部中心側)

- ・ 支持構造体（遮へい体）と回転プラグ駆動部：-398mm (制限目安 100mm 以上)
- ・ 支持構造体（遮へい体）と燃料交換機：-43mm (制限目安 100mm 以上)

上記のうち、支持構造体とルフデッキ端、および支持構造と回転プラグ駆動部の隙間不足については支持構造体を張出し構造とすることで対応可能であると考えられる。支持構造体と燃料交換機間の所定の隙間については、原子炉容器中心側の遮へい体を 170mm 切欠く構造とした。この場合、支持構造体表面での放射性物質の輸送基準を満足できないが（表面から 1m離れた位置で約 36mSv/h）、図 3.2.3-1 に示すように、実際に運転員の立入るオペフロ上での放射線量率は、0.1mSv/h 以下と小さく、運用上の対応は可能と考えられる。

(4) まとめ

複数移送を前提とした固定ラック式炉内中継装置の原子炉容器内への配置を検討した。遮へい体でもある支持構造物を一部張出し構造とし、燃料交換機との干渉部分を切欠く構造とすれば原子炉容器寸法を増加することなく配置が可能であることが明らかになった。



ケース2 距離減衰を考慮した炉上部室の線量率

A点 不足遮へい厚17cmより不足分 $2^{(17/2)} = 362$
 距離減衰分 $(1933/9215)^2 = 1/22.7$
 距離減衰を考慮した遮へいの不足分 $362/22.7 = 16$ (1.6mSv/h相当)

B点 不足遮へい厚1cmより不足分 $2^{(1/2)} = 1.4$
 距離減衰分 $(2216/11462)^2 = 1/26.7$
 距離減衰を考慮した遮へいの不足分 $1.4/26.7 = 0.05$ (0.005mSv/h相当)

C点 必要遮へい厚69cm 確保

図 3.2.3-1 炉内中継装置支持構造物を切欠いた場合の遮へい検討

3.2.4 移送方式比較評価

(1) 概要

固定ラック式炉内中継装置の検討をもとに、物量およびコスト、安全性、運転性、保守補修性、原子炉構造への影響、技術課題の解決見通しの観点より、固定ラック式炉内中継装置を用いた複数体移送と回転ラック式炉内中継装置を用いた単体移送方式の比較評価を行った。回転ラック式炉内中継装置については本年度は検討を実施していないが、平成14年度成果（表3.2.1-1参照）をもとに評価を行った。

(2) 物量およびコスト

固定ラック式炉内中継装置では、大径の複数体ポットの採用に伴い、炉内中継装置、燃料出入機、EVST、燃料検査設備の物量が増加する。複数体移送の採用による物量、コストへの影響を表3.2.4-1および表3.2.4-2に示す。複数体移送を採用しても、物量が1.04倍とする程度で、逆に、炉内中継装置の簡素化（動的機器の削除）により、コスト低減の可能性を有しており、物量およびコストへの影響は非常に小さいと判断できる。

(3) 安全性

いずれの炉内中継装置も、複数の空気間接冷却系を有しており、万一の昇降スティック時にも、これらの冷却系の運転により、所定の燃料被覆管制限温度（長期事象：600℃）を満足することが原則的に可能である。

ただし、回転ラック式炉内中継装置では、燃料通過管と案内管が偏心配置しており、かつ、多重構造の案内筒外表面よりナトリウムポットを冷却しなければならず、昇降スティック位置によっては除熱性低下が懸念されるため空気間接冷却系に加えて、アルゴンガス直接冷却系（ナトリウムポット外表面を直接冷却）などを追加する必要性を有している。固定ラック式炉内中継装置は単純な案内筒形状のため、回転ラック式炉内中継装置よりも除熱性確保が容易である。

(4) 燃料交換時間

固定ラック式炉内中継装置では、炉内および炉外燃料取扱時間の大小に依存するが、複数体移送の採用により、1体あたりの燃料取扱時間を短縮できる可能性を有している。機器速度をパラメータとして燃料取扱時間の比較評価を表3.2.4-3に示す。ケース1は従来燃料交換システムにおける機器速度[2・5]、今回のレファレンス評価としたケース2では今後の開発を見込んだ機器速度を用いた評価を行っている。いずれの機器速度でも、固定ラック式炉内中継装置の方が1体あたりの燃料取扱時間の短縮（最低でも11分/体）が可能である。また、回転ラック式炉内中継装置と相違して、動的機器や、追加遮へい体がないため、燃料交換準備および後始末期間を短縮でき、これらを合わせた定検期間の短縮効果（1モジュールあたり）は、以下のとおりである。

- ・燃料交換期間本体：(11分×112体) / (60分×22時間) ≒1.0日
- ・燃料交換準備および後始末期間：1.0日

短縮期間の合計 2.0日

上記の検討結果をもとに、実際のナトリウム冷却中型炉での運用スケジュールを勘案して、稼働率の向上効果を計算した。ナトリウム冷却中型炉の標準定期点検工程を図3.2.4-1、標準外定期点検工程を図3.2.4-2に示す。2モジュールが同一タービンを使用しており、2モジュール同時に定期検査を行うが、標準定期検査と標準外定期検査を交互に繰り返す計画（例えば、ある定期検査にて、A号機で標準定期検査、B号機で標準外定期検査を実施すれば、次の定期検査にて、A号機で標準外定期検査、B号機で標準定期検査を実施する）で、現状、タービン点検工程（31日）がクリティカルパスを構成している。

稼働率の評価結果を図3.2.4-3に示す。回転ラック式炉内中継装置の稼働率は約95.47%である。一方、固定ラック式炉内中継装置の稼働率は複数体移送の採用により約95.72%と、約0.25%増加する。更に、タービン点検工程をクリティカルパスから除外できれば（31日から29日に短縮）、稼働率は約95.83%まで増加する見通しである。

(5) 破損燃料の早期取出し

複数体ポットの形状は燃料2体分の幾何的な条件および発熱量で決定しているため、破損燃料は1体のみで取扱うことにより、取出し可能な発熱量を大幅に緩和できる。通常の使用済燃料は、炉停止17日後（発熱量22.5kW）に取出すが、除熱上、破損燃料は、炉停止3日後（発熱量45kW）まで取出し時期を早めることが可能である。破損進展防止の観点より、燃料貯蔵時の目安温度450℃（燃料ペレットとナトリウムが反応しない温度）を適用しても、炉停止60日後（発熱量13kW）に取出すことが可能である[5]。一方、通常燃料取扱に対応した燃料収納容器の気密性およびコンファインメントの条件で格納性を確保するには、破損燃料取出し時期を遅らせる必要の可能性がある。除熱性の許容する範囲で早期取出しを達成するには、格納性評価手法の見直しや（ナトリウムによるFP保持効果の取込み）、再循環系の設置など格納性強化方策を採用する必要がある。

(6) 保守補修性

いずれの炉内中継装置も、キャスクによる取付け・取外しが可能である。ただし、固定ラック式炉内中継装置は、動的機器のない単純な円筒構造であるため、原子炉容器内に常設でき、取付け・取外し作業の削除（実証炉では、炉内中継装置の取付け・取外し作業に合計22.5時間を想定しており、3直ベースで約1日短縮が可能）による定検工程の短縮が可能である。

また、固定ラック式炉内中継装置では、複数体移送の採用に伴い、燃料1体あたりの燃料交換機グリッパ昇降回数が2倍に増加するが、負荷荷重の大きい炉心部での昇降回数は同じであり、ユニバーサルジョイント寿命への影響は小さい。

(7) 原子炉構造への影響

回転ラック式炉内中継装置は、炉心中心からの燃料出入孔位置が 3785mm と離れており（固定ラック式炉内中継装置で 3715mm）、かつ、炉上部案内管内に挿入遮へい体を設置できるため、炉上部にて必要な遮へい厚さを確保することが可能である。一方、固定ラック式炉内中継装置は、大型の複数体ポットの使用に伴い、原子炉容器中心側の遮へい体を 170mm 切欠く必要がある。ただし、図 3.2.3-1 に示したように、実際に運転員の立入るオペフロ上で放射線量率は、0.1mSv/h 以下と小さく、運用上の対応は可能と考えられる。

(8) 技術課題の解決見通し

回転ラック式炉内中継装置は、高速増殖原型炉「もんじゅ」などで採用されており、解決すべき技術課題はない。一方、固定ラック式炉内中継装置は、複数体ポットの製作性および除熱性などの技術課題を有するが、研究開発により解決することが可能で、炉内中継装置本体に係る技術課題はない。

(9) 比較評価

上記の検討結果をもとに、回転ラック式および固定ラック式炉内中継装置の比較評価を表 3.2.4-4 に示す。回転ラック式炉内中継装置は、高速増殖原型炉「もんじゅ」、実証炉で採用されている燃料を 1 体ずつ移送する方式で、基本的に技術課題がなく、燃料取扱作業も単純である。一方、固定ラック式炉内中継装置は、大径の複数体ポットの採用に伴い、物量が 1.04 倍増加する程度で、逆に炉内中継装置の簡素化によりコスト低減の可能性を有している。

燃料交換時間について、固定ラック式炉内中継装置では、複数体移送の採用により、燃料取扱時間を 2 日間短縮でき、稼働率の向上（95.47%から最大 95.83%）が可能である。特に、この稼働率向上は、プラント全体で約 0.3～0.4%のコスト低減に相当するため、1 モジュールあたり約 2 日の定期検査期間の短縮であっても、経済性向上への寄与が大きい。稼働率に換算していないが、除熱容量の大きい複数体ポットを利用して、破損燃料の早期取出し（通常燃料と同じ格納性対応で炉停止 9 日後）も可能である。また、炉内燃料交換作業が煩雑化するが、負荷荷重の大きい炉心部での昇降回数は同じであり、燃料交換機ユニバーサルジョイント寿命への影響はない。

原子炉構造との整合性について、固定ラック式炉内中継装置では、炉上部の一部の遮へい体を切欠く必要があるが、運用上の対応は可能である。

以上より、今後、原子炉構造との配置整合性を詳細に検討する必要があるが、複数体移送に伴う稼働率向上に期待できる固定ラック式炉内中継装置を選定する。

(10) まとめ

ナトリウム冷却中型炉の MOX 燃料・高内部転換型炉心（平衡期）を対象として、複数体移送に対応した固定ラック式炉内中継装置の概念を検討した。また、物量およびコスト、安全性、運転性などの観点より、複数体移送に係る比較評価を行い、原子炉構造との配置整合性を検討する必要があるが、稼働率向上に期待できる固定ラック式炉内中継装置を選択した。

表 3.2.4-1 複数体移送の有無による物量比較

対象	回転ラック式炉内中継装置 (1体移送)			固定ラック式炉内中継装置 (複数体移送)		
	基本仕様	基数	物量(ton) ¹⁾	基本仕様	基数	物量(ton) ¹⁾
炉内燃料移送系	燃料交換機	1基	20	マニフレータ式	1基	20
	炉内中継装置	4基	60	固定式 ²⁾	4基	80
炉外燃料移送系	燃料出入機	1基	175	レールス式(収納筒1基、Naホット及び裸燃料、Arガス直接冷却及び空気間接冷却系2系統) ³⁾	1基	195
	使用済燃料移送関連	1基	15	燃料昇降装置 ⁴⁾	1基	15
燃料貯蔵系	水中台車	1基	10	水中台車	1基	10
	使用済燃料プール移送機	1基	50	使用済燃料プール移送機	1基	50
	炉外燃料貯蔵槽	1基(370体)	565	炉外燃料貯蔵槽	1基(370体)	570
燃料処理系	使用済燃料プール ⁵⁾	1基(1365体)	335	使用済燃料プール ⁵⁾	1基(1365体)	335
	燃料洗浄設備	1基	25	乾式燃料洗浄設備(EVST上での洗浄、燃料出入機の冷却系使用)	1基	25
	破損燃料取扱関連	1基	20	燃料検査設備(複数体移送対応)	1基	30
物量合計			1275			1330

注1) 原則的に各メーカ提示値を記載。ただし、各燃料取扱方式で同一、又は、類似仕様の設備で、メーカ間で物量が異なる場合には、実証炉の物量などをもとに外挿

注2) いずれも案内筒の一部はモジュールごとに設置(回転ラック式炉内中継装置の駆動部分はモジュールで共用)

注3) ナトリウムホットを含む

注4) メーカ提示概念では、燃料出入機が水中台車に直接アクセスするが、Na-水雰雰囲気分離の観点より、追加設置

注5) 使用済燃料プールの物量のうち、貯蔵ラック及びライターはEVST貯蔵方式側、冷却系は実証炉の数値などをもとに外挿

表 3.2.4-2 複数体移送の有無によるコスト比較

対象	回転トラック式炉内中継装置 (1体移送)		固定トラック式炉内中継装置 (複数体移送)	
	燃料移送系	炉内	燃料交換機、炉内中継装置	燃料交換機、炉内中継装置
	炉外	燃料出入機	燃料出入機	燃料出入機
	小計	上記以外の燃料移送機	上記以外の燃料移送機	上記以外の燃料移送機
燃料貯蔵系	使用済燃料関連	移送系小計	移送系小計	移送系小計
		炉外燃料貯蔵槽 容器本体	炉外燃料貯蔵槽 容器本体	炉外燃料貯蔵槽 容器本体
		炉外燃料貯蔵槽 冷却系	炉外燃料貯蔵槽 冷却系	炉外燃料貯蔵槽 冷却系
		使用済燃料プール	使用済燃料プール	使用済燃料プール
	小計	貯蔵系小計	貯蔵系小計	貯蔵系小計
燃料処理系	燃料洗浄関連	燃料洗浄設備	燃料洗浄設備	燃料洗浄設備
	破損燃料取扱関連	燃料検査設備	燃料検査設備	燃料検査設備
	小計	燃料処理系小計	燃料処理系小計	燃料処理系小計
ナトリウム	EVST関連			
その他		電源関連の追加分	電源関連の追加分	建屋配置関連の追加分
燃料取扱設備 ¹⁾	合計		112.2	108.8

注1) 表4.2-2の水プール直接貯蔵方式の合計コストを100とする相対値

表3.2.4-3 (1/2) 移送方式による燃料交換時間比較 (ケース1)

大項目	項目	単位	単体移送	複数体移送	備考	
移動距離	出入機走行距離	m		27		
	出入機グリッパ昇降距離 (炉上部) (EVST上部)	m		29		
機器速度	出入機グリッパ回避距離 (単体移送) (複数体移送)	m		0.3		
	燃料交換機グリッパストローク	m		5.7		
	出入機走行速度 (高速) (低速)	m/min		5		
	出入機グリッパ昇降速度 (高速) (低速)	m/min		0.1		
	燃料交換機グリッパ昇降速度 (高速) (低速)	m/min		6		
	燃料交換機グリッパ昇降速度 (高速) (低速)	m/min		0.6		
	燃料交換機アームスイング速度	m/min		3		
	燃料交換機アームスイング速度	m/min		0.3		
	移動以外の時間条件			1.55		
	移動以外の時間条件			0.5		
炉内移送時間	出入機グリッパ開閉時間	min		0.5		
	燃料交換機グリッパ開閉時間	min		0.5		
	回転ラック式炉内中継装置回転時間	min		0.5		
	EVST回転ラック回転時間	min		0.5		
	ドアバルブ接続固定、ガス置換時間	min		3.3		
	炉内移送時間	min	25	74.9		
	炉外移送時間	走行・昇降時間	min	31.2	31.2	
		ドアバルブ接続固定等	min	16.7	16.7	
		炉内回避待ち時間	min	1.5	28.9	
		小計	min	49.4	76.8	
1集合体当たり		min	49.4	38.4		
モジュール当たり		day	4.19	3.26		
モジュール当たり+準備後始末		day	9.19	7.26	*1	
2モジュール目		day	18.38	14.52		
平均		day	13.79	10.89		
低減効果		day		1.93		
低減効果	day		3.86			
低減効果	day		2.90			

*1: 単体移送5日(燃料交換機準備後始末4日+炉内中継装置準備後始末1日)、複数体移送4日(燃料交換機準備後始末4日)

表3.2.4-3 (2/2) 移送方式による燃料交換時間比較 (ケース2)

大項目	項目	単位	単体移送	複数体移送	備考
移動距離	出入機走行距離	m		27	
	出入機グリッパ昇降距離	m	(炉上部)	29	
		m	(EVST上部)	15	
機器速度	出入機グリッパ回避距離	m	(単体移送)	0.3	
		m	(複数体移送)	5.7	
	燃料交換機グリッパストローク	m		5.8	
	出入機走行速度	m/min	(高速)	10	*1
		m/min	(低速)	0.1	
	出入機グリッパ昇降速度	m/min	(高速)	6	
	m/min	(低速)	0.6		
燃料交換機グリッパ昇降速度		m/min	(高速)	6	*2
		m/min	(低速)	0.6	
燃料交換機アームスイング速度		m/min		2.3	*3
		m/min		0.5	
移動以外の時間条件	出入機グリッパ開閉時間	min		0.5	
	燃料交換機グリッパ開閉時間	min		0.5	
	回転ラック式炉内中継装置回転時間	min		0.5	
	EVST回転ラック回転時間	min		0.5	
	ドアバルブ接続固定、ガス置換時間	min		3.3	
	炉内移送時間	min		15.8	52.6
	炉外移送時間	min		26.9	26.9
走行・昇降時間	ドアバルブ接続固定等	min		16.7	16.7
	炉内回避待ち時間	min		1.5	18.9
	小計	min		44.0	61.4
	1集合体当たり	min		44.0	30.7
	モジュール当たり	day		3.74	2.61
	モジュール当たり+準備後始末	day	1モジュール目	8.74	6.61
		day	2モジュール目	17.48	13.22
		day	平均	13.11	9.92
	モジュール当たり+準備後始末	day	1モジュール目		2.13
		day	2モジュール目		4.26
低減効果	day	平均		3.19	

*1: レールレス燃料出入機の現状の推定最高速度、低速側は±1mの位置決め精度が要求されるために高速化は困難と判断
 *2: 高速作動時のユニバーサルジョイント寿命評価が必要。ただし、3/min以下の試験では速度による寿命依存性は見られなかった。
 *3: 燃料交換機軸受けの寿命評価が必要。

表 3.2.4-4 炉内中継装置の比較評価(複数体移送の採用)

項目 ¹⁾	回轉ラック式炉内中継装置 (1体移送)		固定ラック式炉内中継装置 (複数体移送)	
	1275 ton	112.2	1330 ton	108.8
経済性	燃料取扱設備物量	○ ⁺	○ ⁺	○
安全性	燃料取扱設備コスト ²⁾	○	○	○ ⁺
	除熱性(昇降停止時の冷却対応)	多重円筒で、かつ、偏心構造のため、Naポット直接冷却系の設置が望ましい	○	○ ⁺
運転性	格納性	燃料1体の破損時にも、燃料収納容器気密性とコンファインメントにより破ばく制限目安達成の見通し	◎	◎
	燃料取扱時間 ³⁾	45分/体	○	◎
	燃料交換期間(燃料交換準備、後始末を含む)	約9日	○	◎
	稼働率	95.47%(原子炉運轉26か月、定期検査36.75日)	○	◎
保守補修性	破損燃料取扱(早期取出しの可能性)	通常燃料と同様に、炉停止17日後に取出し(22.5kW)	○	◎
	燃料交換機ユニバーサルジョイント寿命	3燃料交換	○ ⁺	○
原子炉構造との配置整合性	炉内中継装置の取付け・取外しの必要性	原子炉運轉中は、炉内中継装置本体を取外し	○	◎
		現状の原子炉構造と整合の見通し	○ ⁺	○
技術開発		既往知見により対応可能	○ ⁺	○
			○	○
評価		(従来方式)	-	選定

注1) 要求条件に対して、◎: 余裕をもって達成、○: 達成、△: 達成できず

注2) 表4.2-2の水プール直接貯蔵方式の合計コストを100とする相対値

注3) 複数体移送の有無により燃料取扱時間は約11分/体相違。よって、燃料取扱時間は、1体移送で45分/体、複数体移送で34分/体と設定

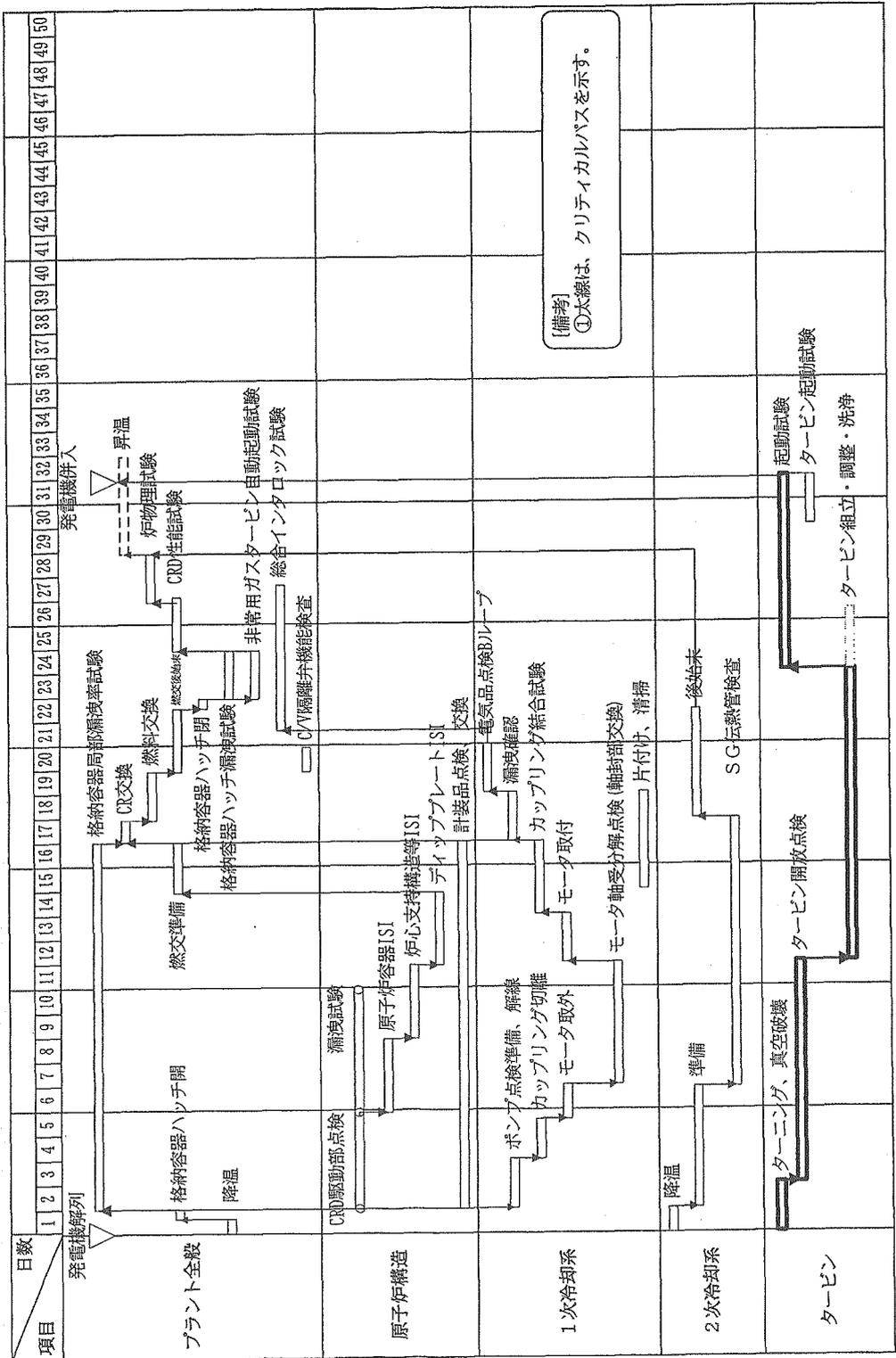


図 3.2.4-1 ナトリウム冷却中型炉の定期点検工程（標準）

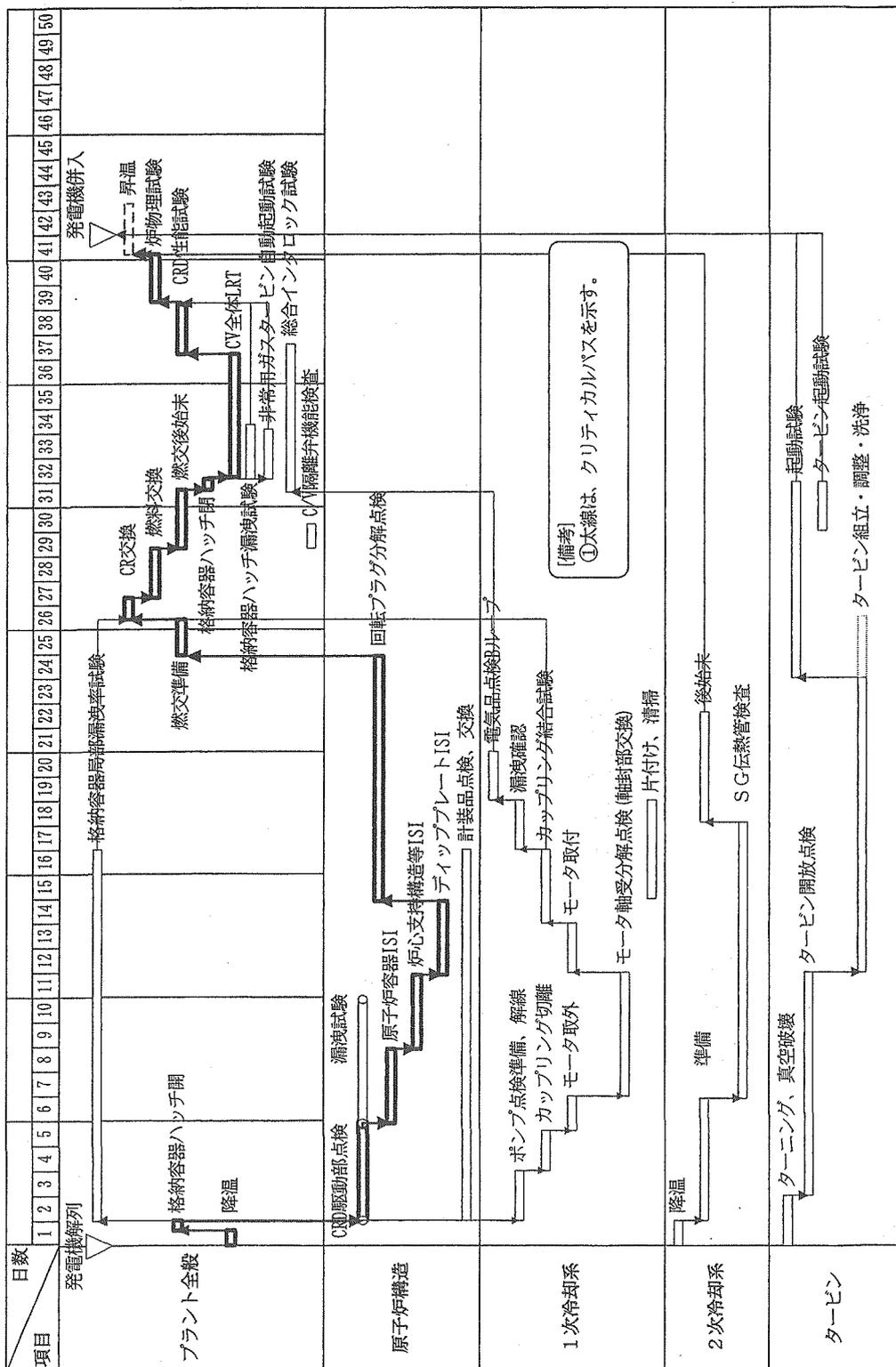
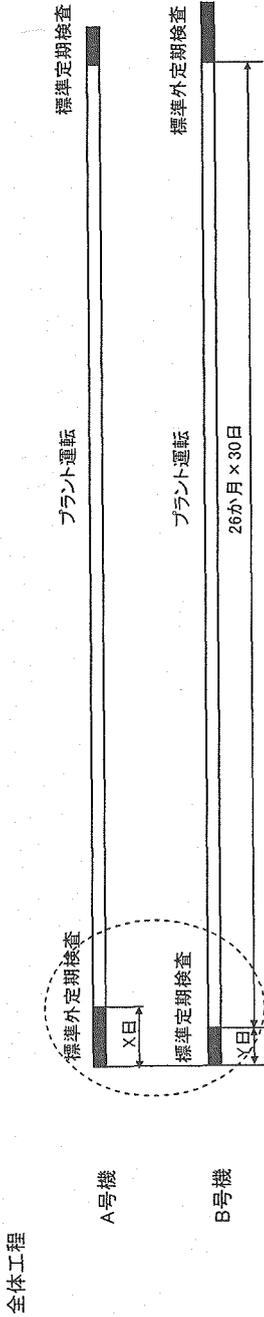


図 3.2.4-2 ナトリウム冷却中型炉の定期点検工程（標準外）



定期検査工程

回転ラック式炉内中継装置 (1体移送)

日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43							
A号機	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
標準外定期検査	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
B号機	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
標準定期検査	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
タービン	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
出力(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

固定ラック式炉内中継装置 (複数体移送、タービン点検期間31日)

日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39													
A号機	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
標準外定期検査	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
B号機	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
標準定期検査	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
タービン	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
出力(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

固定ラック式炉内中継装置 (複数体移送、タービン点検期間29日)

日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39													
A号機	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
標準外定期検査	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
B号機	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
標準定期検査	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
タービン	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
出力(%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

稼働率 回転ラック式炉内中継装置 (1体移送)

$$\frac{[(26\text{か月} \times 30\text{日} + 31\text{日}) \times 2 - (31\text{日} + 11\text{日} \times 0.5 + 1\text{日} \times 0.25) \times 2]}{(26\text{か月} \times 30\text{日} + 31\text{日}) \times 2} \times 100 = 774.25\text{日}/811\text{日} \times 100 = 95.47\%$$

固定ラック式炉内中継装置 (複数体移送) (タービン点検期間31日)

$$\frac{[(26\text{か月} \times 30\text{日} + 31\text{日}) \times 2 - (31\text{日} + 7\text{日} \times 0.5 + 1\text{日} \times 0.25) \times 2]}{(26\text{か月} \times 30\text{日} + 31\text{日}) \times 2} \times 100 = 776.25\text{日}/811\text{日} \times 100 = 95.72\%$$

固定ラック式炉内中継装置 (複数体移送) (タービン点検期間29日)

$$\frac{[(26\text{か月} \times 30\text{日} + 29\text{日}) \times 2 - (29\text{日} + 7\text{日} \times 0.5 + 1\text{日} \times 0.25) \times 2]}{(26\text{か月} \times 30\text{日} + 29\text{日}) \times 2} \times 100 = 775.25\text{日}/809\text{日} \times 100 = 95.83\%$$

図 3.2.4-3 複数体移送の有無による稼働率の評価結果

3.3 燃料出入機

3.3.1 構造概念検討

(1) 概要

燃料出入機は原子炉容器から EVST および EVST から使用済燃料プール間の移送を行う装置である。ナトリウム冷却中型炉は 4 モジュールで 1 プラントを構成するため、燃料出入機は自由度の高い走行が求められる。ここでは平成 14 年度に実施されたレールレス走行方式燃料出入機の検討をまとめた。

(2) 検討条件

ナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントを対象としてレールレス燃料出入機の検討を行う。主要な条件を以下に示す。

・炉容器から EVST

・集合体発熱量	: 21kW/体
・取扱対象	: ナトリウムポット
・冷却方式	: 空気間接冷却
・ナトリウムポット外径	: 528mm
・ナトリウムポット高さ	: 4630mm

・EVST から使用済燃料プール

・集合体発熱量	: 5kW/体
・取扱対象	: 裸燃料
・冷却方式	: アルゴンガス直接冷却
・集合体対面間距離	: 177.6mm
・集合体高さ	: 4400mm

・電源仕様 (暫定値)

・給電容量	: 130kW
・給電電圧	: 440V

(3) 検討結果

燃料出入機概念図を図 3.3.1-1 に示す。レールレス走行に適した走行台車として機器据付のための台車としてミリオーダーの位置決め精度に実績のあるマイクロドローリを採用した (文献[6])。マイクロドローリの概念図を図 3.3.1-2、配置図を図 3.3.1-3 に示す。燃料出入機の総重量は約 200ton に達するため床荷重を低減するため 8 基のマイクロドローリにより 1 基当たりの荷重を 25ton とした。走行速度としてはマイクロドローリの従来実績は 5m/min 程度だが、機器大型化により 20m/min 程度まで対応可能と考えられる (文献[7])。位置決め方法の概念図を図 3.3.1-4 に示す。基本的には誘導ケーブル等により行うが、ドアバルブ付近では約 1mm の精度が要求されるため、マイクロドローリ本体の位置センサを用いること

により高精度の位置決めに対応する。

冷却系としては炉容器から EVST までの輸送のためのナトリウムポット間接冷却系と EVST から使用済燃料プールまでの裸燃料直接冷却系を搭載している。冷却系仕様については 3.3.3 項で検討を行う。

燃料出入機グリッパの概念図を図 3.3.1-5 に示す。ナトリウムポットと裸の燃料集合体の 2 種類を取扱うことを想定して図 3.3.1-6 に示すような付け替え式のグリッパを採用している。

レールレス方式特有の課題として従来方式であるレール方式で採用されていたレールフックによる転倒防止が採用できないため、サスペンション等を用いた転倒防止対策が必要である。耐震性については 3.3.2 項で成立性評価を行う。

給電方式としては図 3.3.1-7 に示すようなケーブル巻取り方式を採用した。ケーブル径を 75mm と仮定すると、ドラム内径を 850mm の場合(図 3.3.1-8 参照)は 12 段巻きで約 50m の巻取りが可能であり、走行距離を十分確保可能であると考えられる。

(4) まとめ

ナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントに適合する燃料出入機としてレールレス燃料出入機を検討した。レールレス方式特有の課題として位置決め複雑さと転倒防止等の耐震性の確保が考えられる。耐震性については 3.3.2 項において評価を実施した。

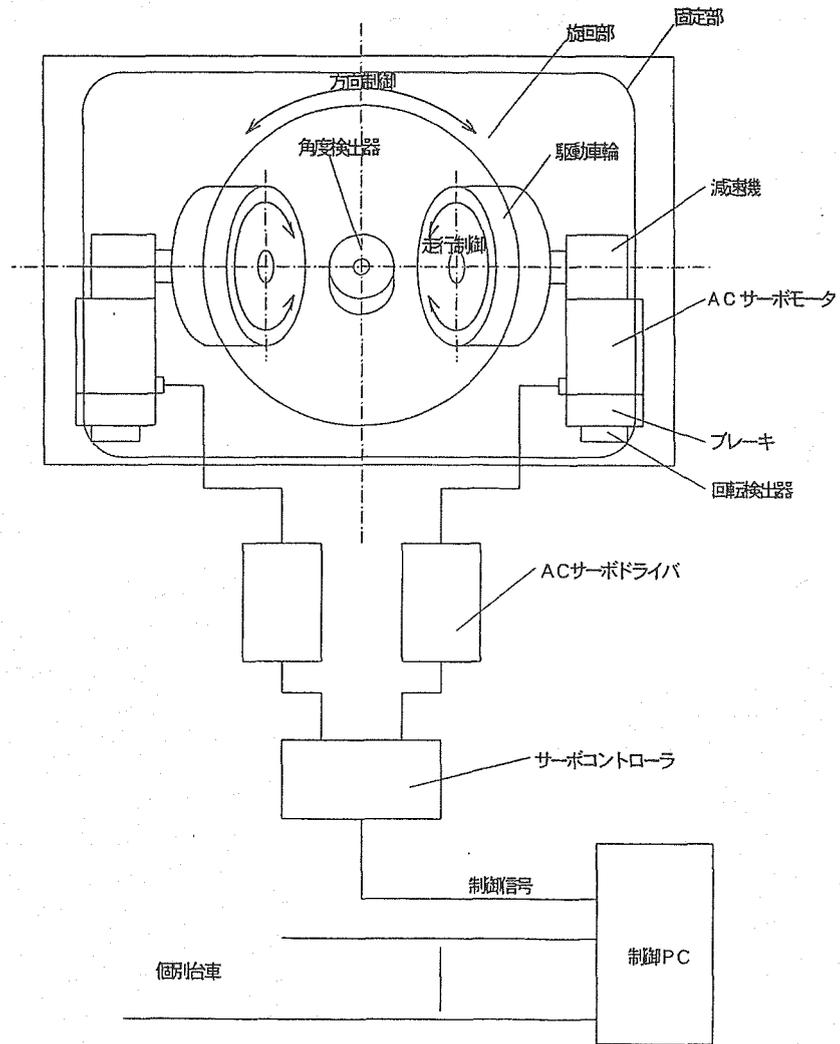


図 3.3.1-2 マイクロドーリ概念図

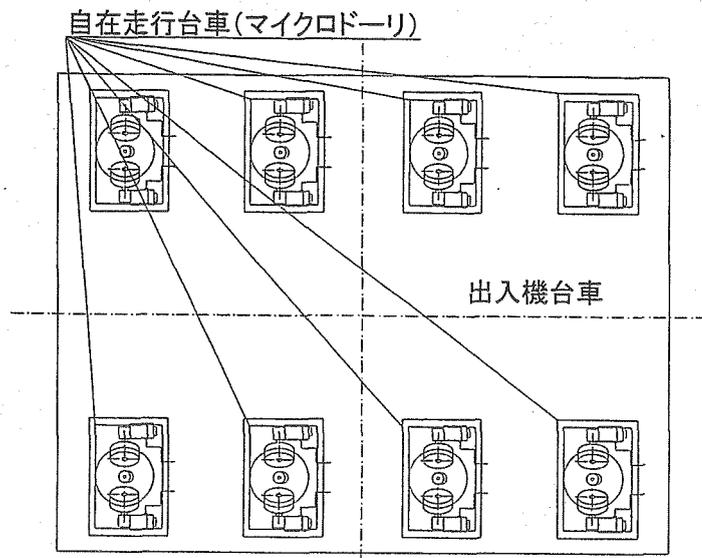
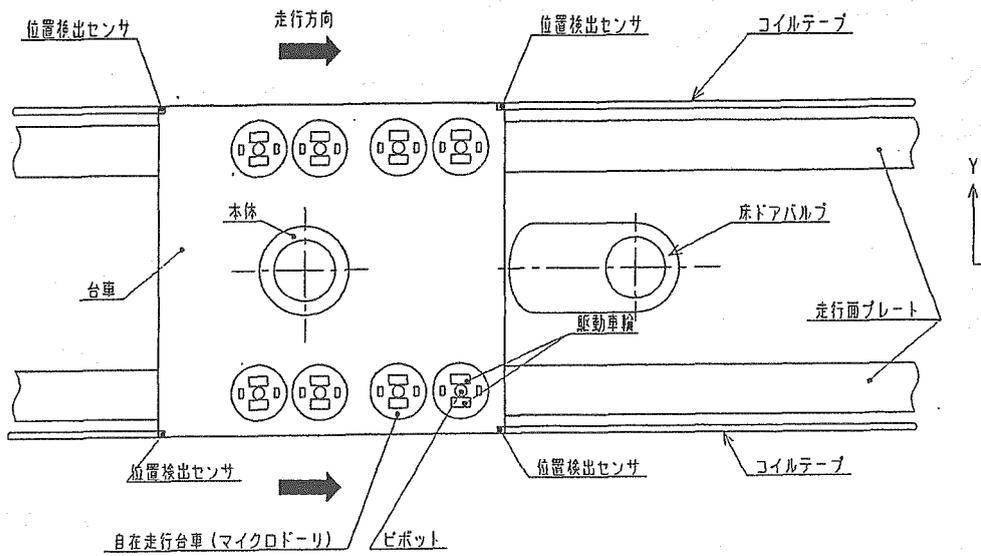
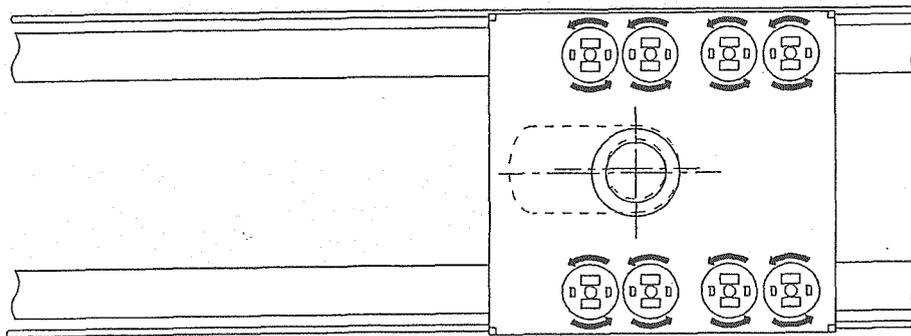


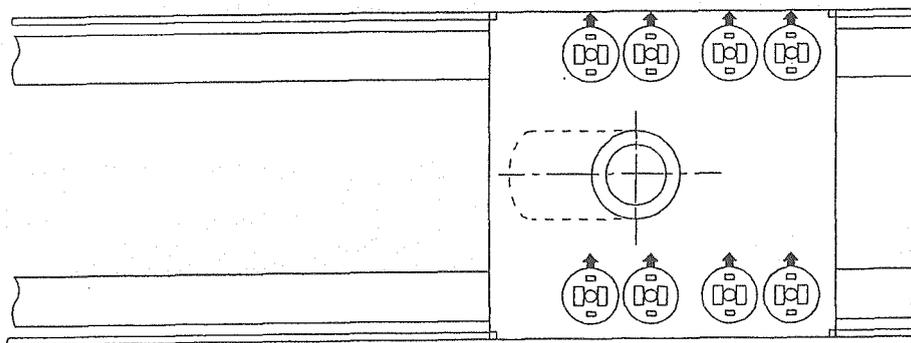
図 3.3.1-3 マイクローリ配置図



a) X方向へ走行、ドアバルブ近傍で高速→低速へ



b) 走行方向 (X方向) 位置決め、位置ずれ確認必要に応じてマイクロドリーその場旋回



c) Y方向位置決め、ドアバルブ接続

図 3.3.1-4 燃料出入機位置決め方法概念図

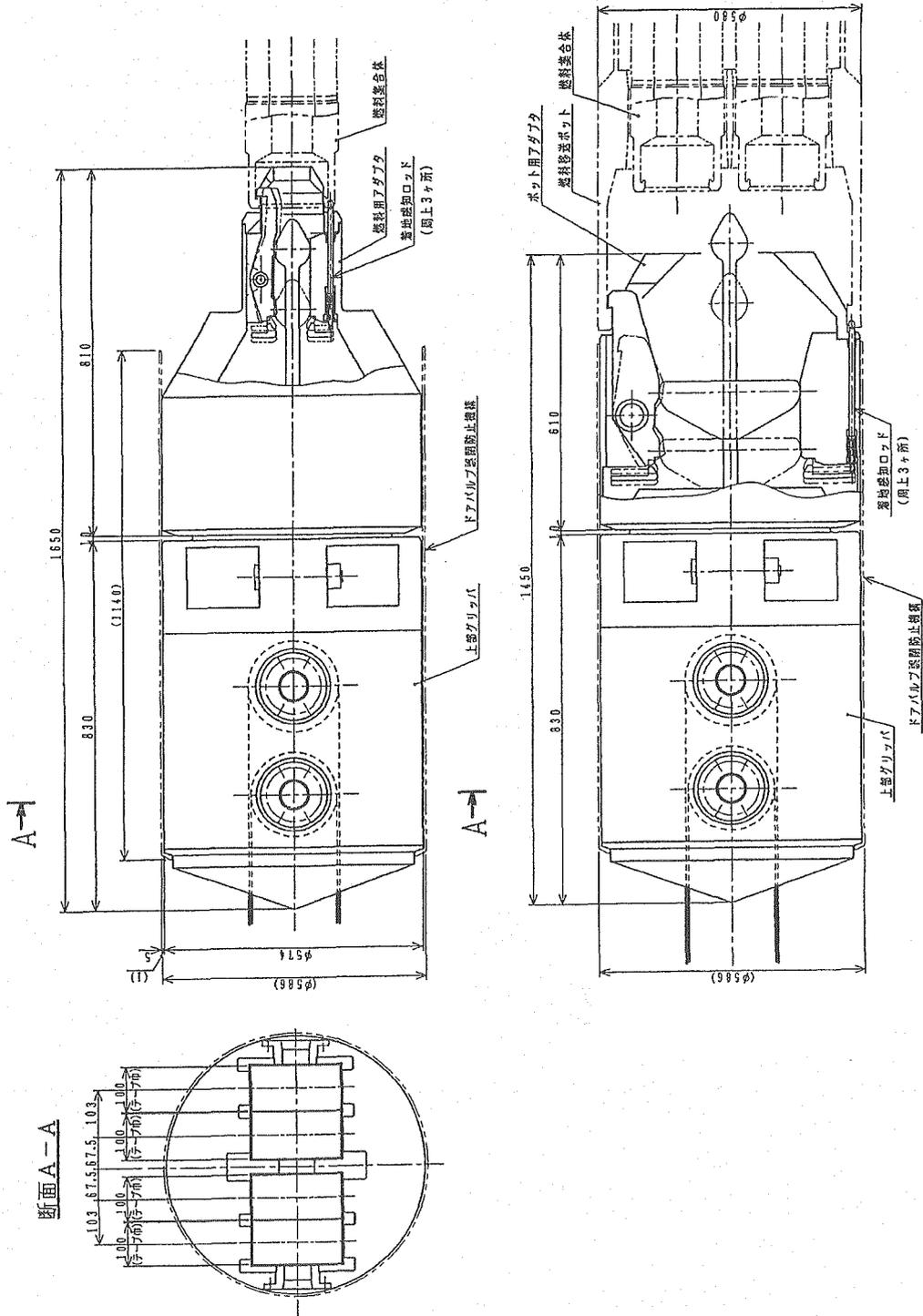


図 3.3.1-5 燃料出入機グリッパ構造概念図

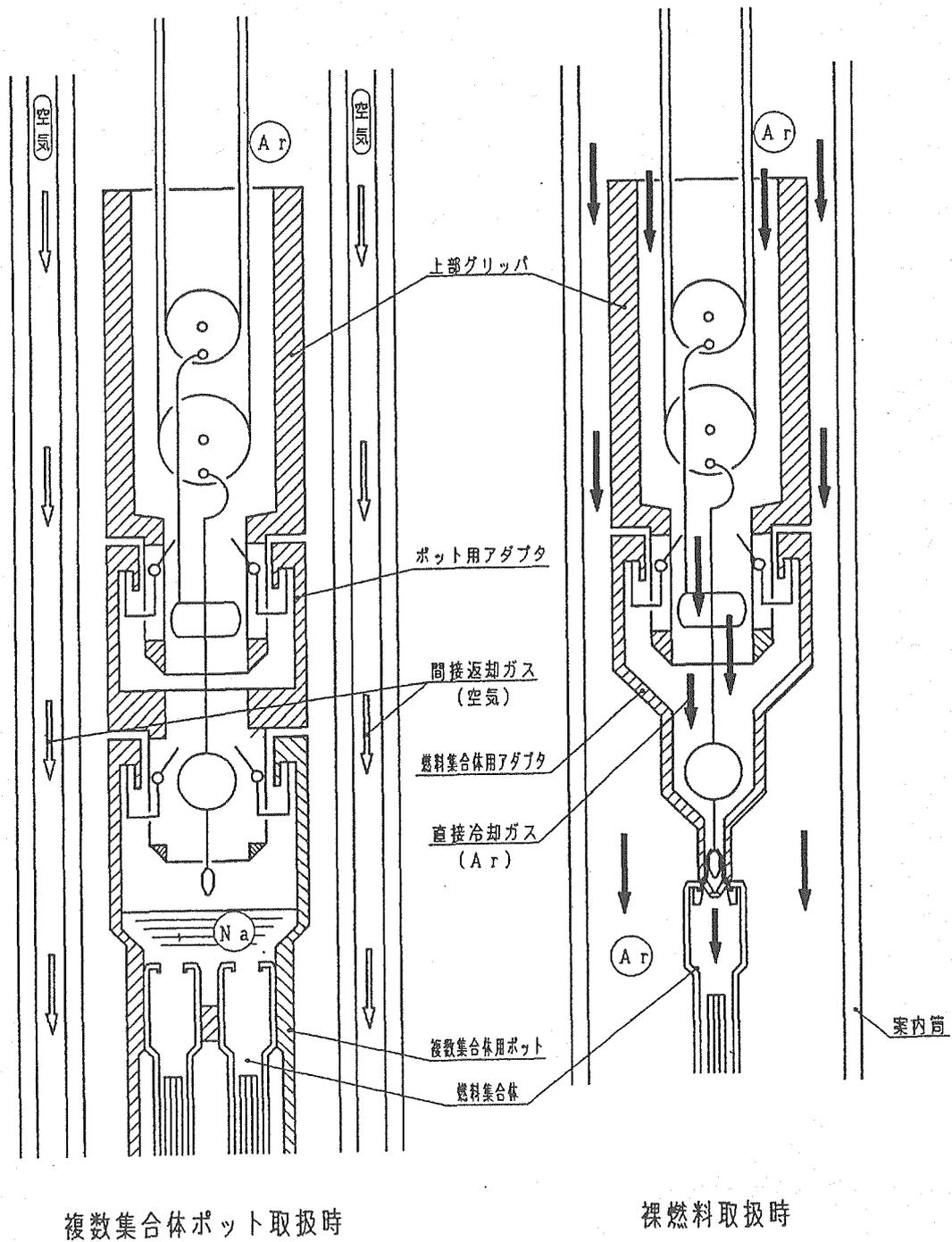


図 3.3.1-6 燃料出入機付け替えグリッパ概念図

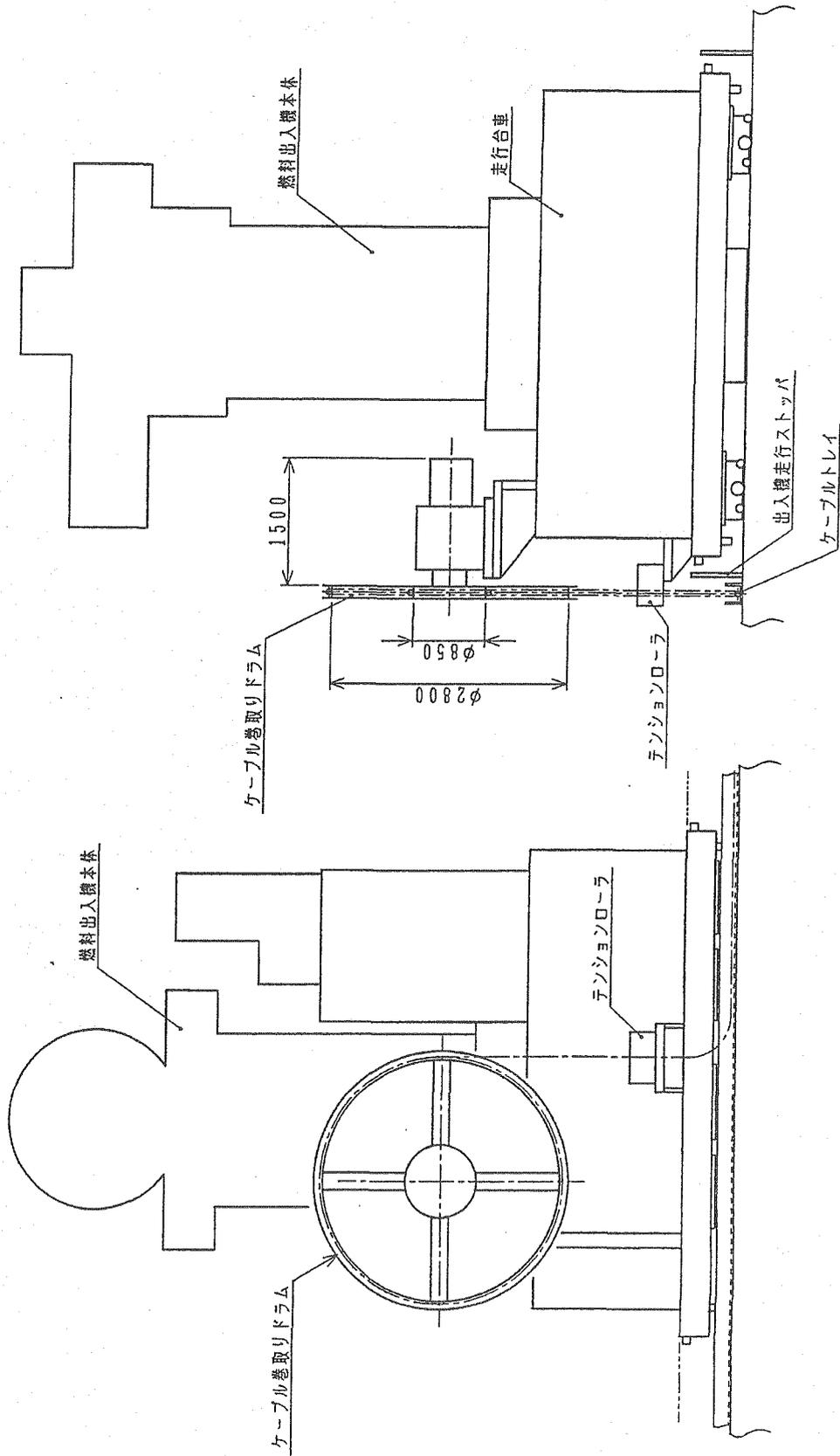


図 3.3.1-7 燃料出入機ケーブル巻取り方式概念図

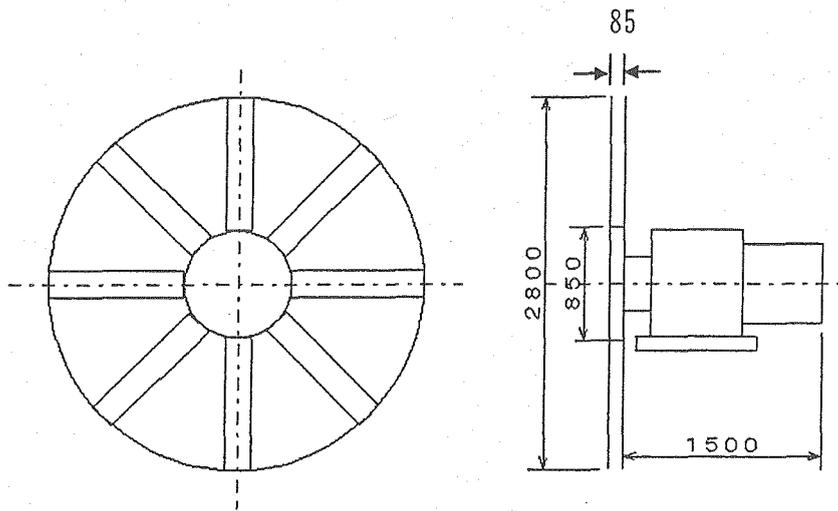


図 3.3.1-8 燃料出入機ケーブル巻取り機概念図

3.3.2 耐震性評価

(1) 概要

レールレス方式燃料出入機の課題として、レールフックによらない台車の転倒防止が挙げられる。ここでは地震時において燃料出入機転倒を防止することが可能か評価した。

(2) 検討条件

レールレス方式燃料出入機の耐震性評価の検討条件を以下に示す。

- ・燃料出入機重量 : 200ton (概略重量)
- ・台車基数 : 8基
- ・S2地震床応答曲線 : 図 3.3.2-1 減衰率 1%参照
- ・強地震条件 : S2地震の加速度の 1.5倍
- ・台車幅 : 7m (暫定)
- ・台車重心高さ : 3.5m (暫定)
- ・台車水平方向固有振動数 : 4Hz (付録 1 参照)

(3) 判断条件検討

燃料出入機の転倒防止条件の計算体系を図 3.3.2-1 に示す。転倒防止条件は以下の式で表される。

$$M_1 < M_2$$

ただし、 M_1 、 M_2 はそれぞれ転倒モーメントと復元モーメントで以下の式で表される。

$$M_1 = W_1 Y$$

$$M_2 = W_2 \frac{X}{2}$$

$$W_1 = mb$$

$$W_2 = m(1G - a)$$

a : 垂直方向地震動 (G)

b : 水平方向地震動 (G)

X : 台車幅

Y : 台車重心高さ

転倒防止条件は以下の式で表される。

$$b < (G - a) \frac{X}{2Y}$$

(4) 転倒防止評価

減衰率をパラメータとして評価した S2 地震の水平方向の床応答曲線図 3.3.2-2 に示す。対策なしの場合は減衰率 1%に相当する。燃料出入の水平方向の固有振動数を 4Hz とすると、水平方向の床応答加速度は 0.6G 相当と評価され、S2 地震を想定する場合は上下方向の加速度を 0.4G が転倒防止の条件となる。

上下方向の床応答加速度と台車幅の関係を図 3.3.2-3 に示す。燃料出入機幅を増加した場合は上下方向の加速度の制限値が緩和される。S2 地震を想定する場合は台車幅 7m で 0.4G、台車幅 10m で 0.58G の制限となる。ただし、強地震を想定した場合は、台車幅 7m で 0.1G、台車幅 10m で 0.37G と大幅に加速度を低減する必要がある。

上下方向の床応答曲線を図 3.3.2-4 に示す。燃料出入機の剛性を増加したとして上下方向の固有振動数を 25Hz まで上昇したと仮定しても、加速度は 0.4G 程度あると評価された。このため強地震を想定した場合は燃料出入機の剛性増加により上下方向の制限加速度を達成することは困難であると考えられる。このため、燃料出入機にコイルバネとダンパによるサスペンションを設置して上下方向の固有値を低下および減衰率 5%とし、上下方向の加速度制限を 0.1G 程度まで緩和することを検討した。マイクロドローリ当たり 4 体のバネを設置することを仮定すると上下方向加速度を 0.4G (S2 地震対応)、0.1G (強地震対応) としたときの必要バネ定数 k は以下の式からそれぞれ $7.99 \times 10^5 \text{N/m}$ 、 $4.35 \times 10^4 \text{N/m}$ と評価された。

$$k = m(2\pi f)^2$$

m : バネ荷重 (6250kg/基)

f : 要求固有振動数 (5%減衰)

この固有振動数に対応するバネ仕様は以下の式から、S2 地震対応でコイル径 230mm×巻数 6.3、強地震対応でコイル径 350mm×巻数 7.9 で対応可能な見通しである。

$$k = \frac{Gd^4}{8ND^3}$$

G : 横弾性係数 ($7.84 \times 10^{10} \text{N/m}^2$)

d : コイル線径

N : 巻数

D : コイル直径

ダンパの仕様設定根拠を図 3.3.2-5 に示す。減衰率を 5%とするとシリンダ径は 100mm 程度と評価される。

サスペンションにコイルバネとダンパの組合せを用いた場合、水平方向のバネ変位差からロッキングが懸念される。図 3.3.2-6 にロッキングによる転倒可能性を評価して示す。ダンパによる減衰効果のため水平方向の加速度が低減されているため、ロッキング振動が生じた場合でも転倒防止条件を満たすと考えられる。

以上の検討から設定した燃料出入機サスペンションの概念図を図 3.3.2-7 に示す。各マイクロドローリに 4 体のバネと 1 体のダンパを組み合わせることによりサスペンションを形成している。

(5) まとめ

レールレス方式燃料出入機の転倒防止対策としてコイルバネとダンパの組合せを検討した。コイルバネにより上下方向の固有値を低下させることにより、強地震においても台車の転倒を防止可能であると評価された。

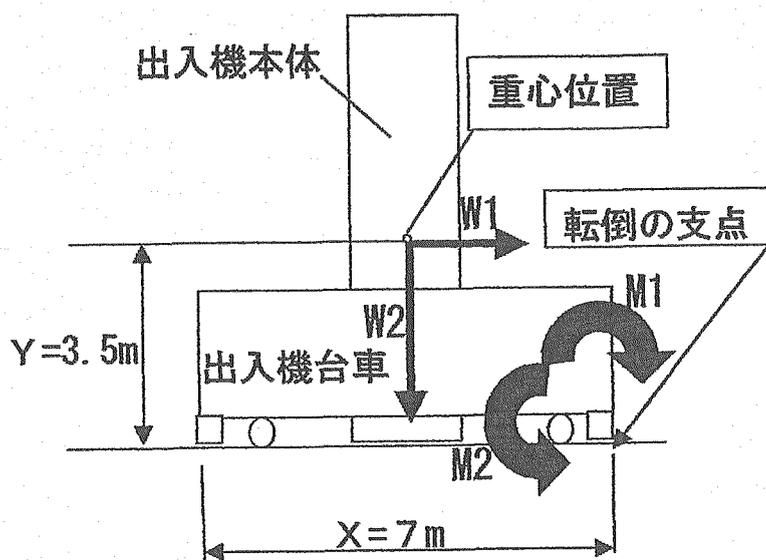


図 3.3.2-1 燃料出入機転倒条件の計算体系

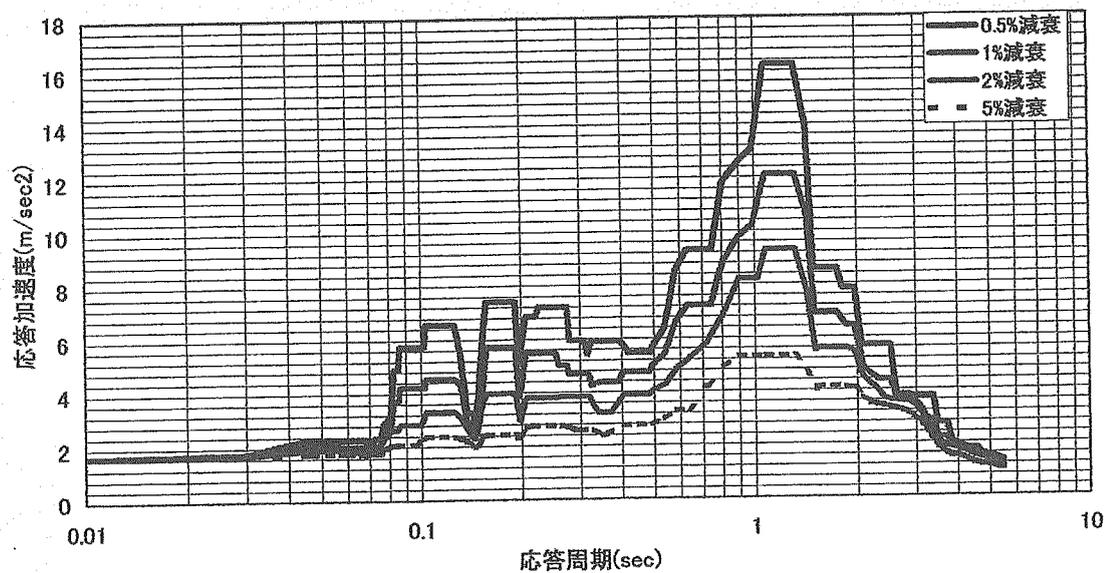


図 3.3.2-2 燃料出入機耐震性評価用の床応答曲線（水平方向）

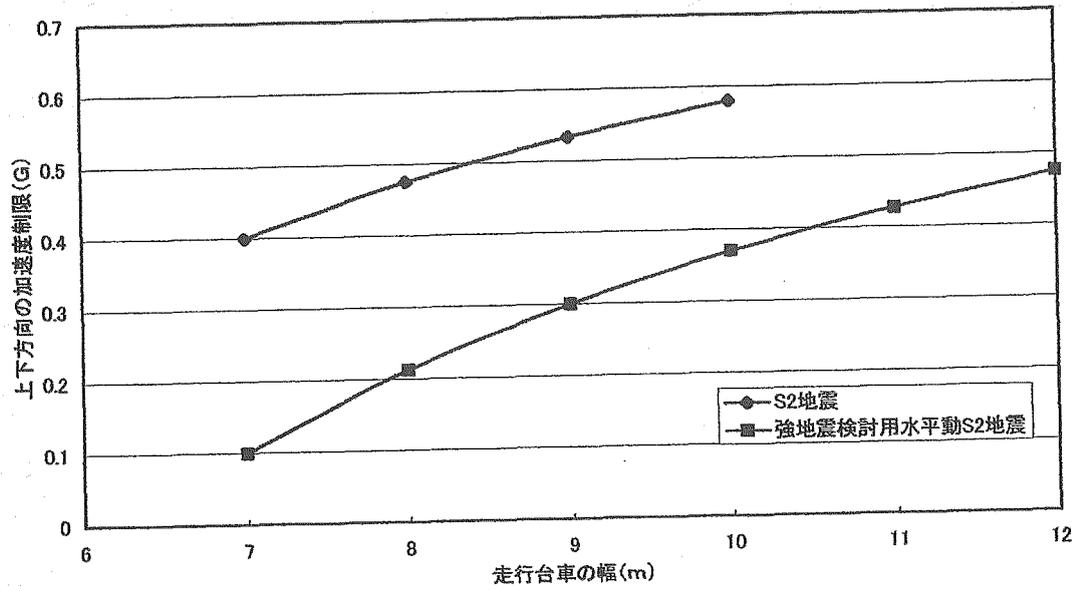


図 3.3.2-3 燃料出入機幅と上下方向加速度の関係

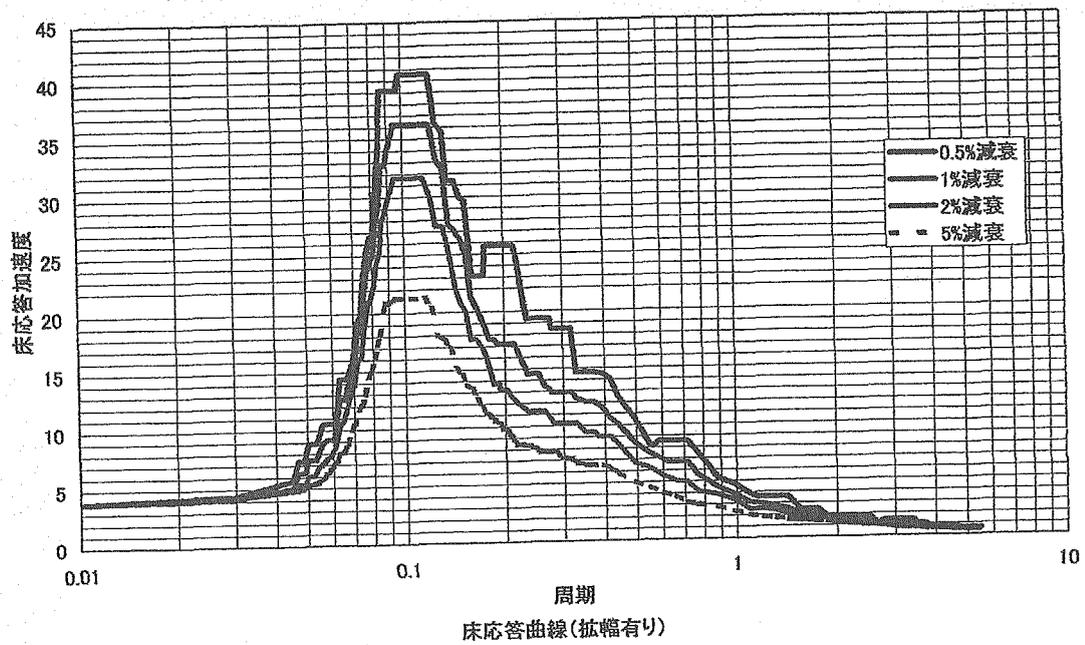


図 3.3.2-4 燃料出入機耐震性評価用の床応答曲線 (上下方向)

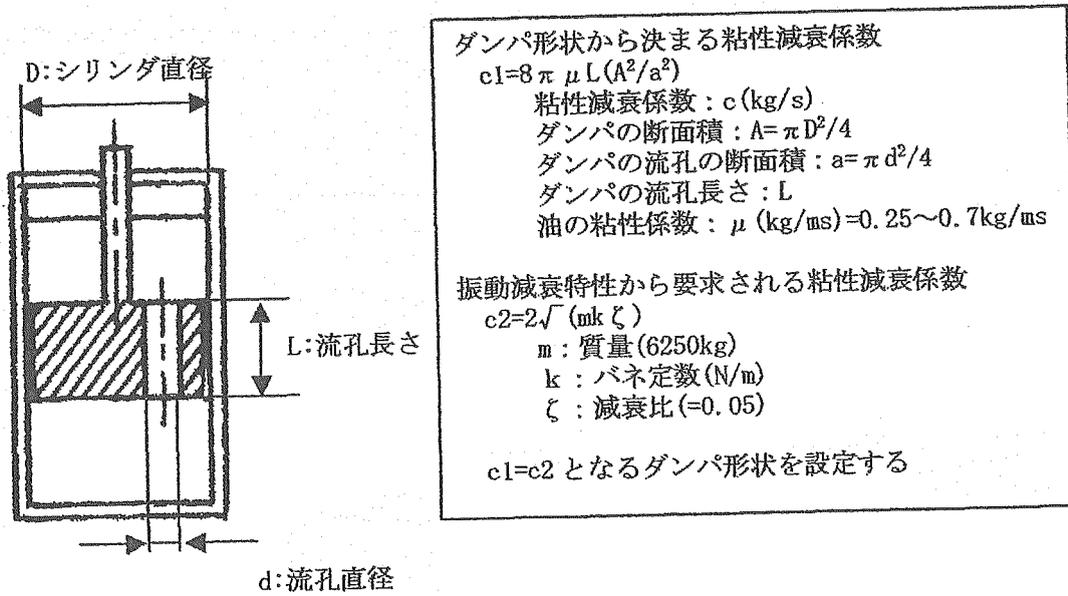


図 3.3.2-5 ダンパ寸法設定根拠

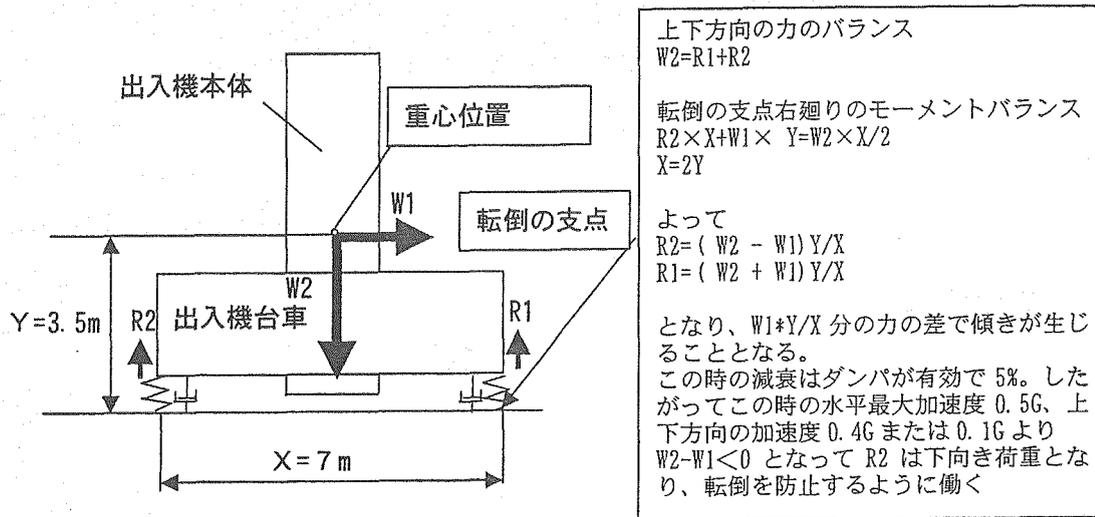


図 3.3.2-6 燃料出入機ロック防止概念図

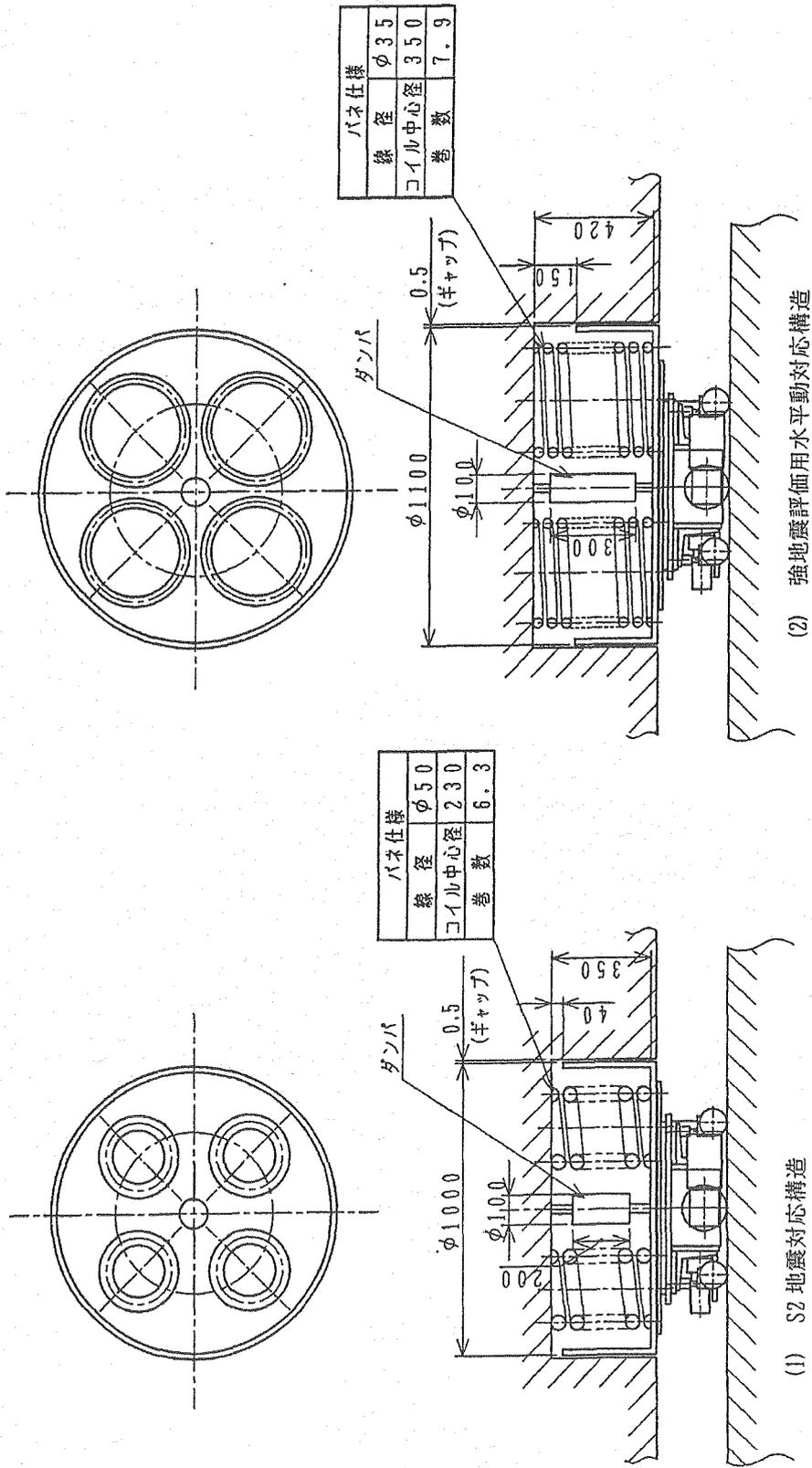


図 3.3.2-7 燃料出入機サスペンション構造概念図

3.3.3 冷却系検討

(1) 概要

ナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントを対象としてレールレス方式燃料出入機冷却系の検討を行う。原子炉容器から EVST までのナトリウムポット取扱と EVST から使用済燃料プールまでの裸燃料取扱について冷却系仕様を具体化した。複数体移送の採用により、間接冷却系は除熱容量が倍になる効果、直接冷却系は収納部径が増加し無駄流れが増加する効果を比較するために単体移送の場合の冷却系仕様についても検討した。

(2) 検討条件

検討対象はナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントに適合したレールレス方式燃料出入機とする。主要な条件を以下に示す。

・炉容器から EVST

・集合体発熱量	: 21kW/体 (平成 14 年度条件)
・取扱対象	: ナトリウムポット
・冷却方式	: 間接冷却 (移送系故障時)
・冷却ガス	: 空気
・冷却ガス温度	: 40°C
・冷却ガス流量	: 10Nm ³ /min/体 (文献[5])
・ナトリウムポット外径	: 528mm (複数体移送、2 集合体ポット) : 330mm (単体移送、1 集合体ポット)
・ハンドリングヘッド外径	: 365mm
・ナトリウムポット高さ	: 4630mm
・系統構成	: 100%×2 系統

・EVST から使用済燃料プール

・集合体発熱量	: 5kW/体
・取扱対象	: 裸燃料
・冷却方式	: 直接冷却
・冷却ガス	: アルゴンガス
・冷却ガス温度	: 150°C (移送時)、300°C (洗浄時)
・被覆管制限温度	: 350°C (移送時)
・集合体対面間距離	: 177.6mm
・集合体高さ	: 4400mm
・系統構成	: 100%×2 系統
・冷却ガス流量	: 2.5Nm ³ /min 以上
・冷却ガス入口温度	: 350°C

(3) 間接冷却系検討

原子炉容器からEVSTまでの移送は使用済燃料をナトリウムポットに収納して移送する。通常移送時はナトリウムポットの熱容量があるため冷却は行わないが、移送系が故障した場合はナトリウムポットを間接冷却により冷却する。燃料中継装置から燃料出入機にナトリウムポットを移送中、燃料出入機からEVSTにナトリウムポットを移送中については床側の冷却系と接続し移送系故障により停止した場合に間接冷却する（図 3.3.3-1 参照）。冷却ガスは運転床雰囲気用の空気を用いる。冷却系は100%×2系統として非常用ガスタービンおよび無停電電源に接続している。

最も厳しい条件として燃料中継槽から燃料出入機にナトリウムポットが移送系故障により停止した場合のヒートマスバランスの検討を行った。この時の冷却ガス流路各部の寸法を表 3.3.3-1 に示す。冷却ガス温度を40℃、冷却ガス流量を10Nm³/min/体の条件で、冷却系の圧力損失およびブロワによる昇温をそれぞれ表 3.3.3-2、表 3.3.3-3 に示す式を用いて評価した。各部の圧力損失内訳を表 3.3.3-4 に示す。単体移送（1 集合体ポット）、複数体移送（2 集合体ポット）それぞれ1000、1100mmAqと評価された。また、ブロワによる空気圧力増加による昇温は単体移送、複数体移送それぞれ12.9、14.1℃となり、最終的なヒートマスバランスは以下のように評価された。

	単体移送	複数体移送
ブロワ入口温度	40℃	40℃
流量	10 Nm ³ /min	20 Nm ³ /min
ブロワ昇圧	1000mmAq	1100mmAq
ブロワ出口温度	52.9℃	54.1℃
間接冷却後出口温度	149.7℃	150.9℃
ブロワ設計流量	12 Nm ³ /min	24 Nm ³ /min
ブロワ設計差圧	1300mmAq	1430mmAq

(4) 直接冷却系検討

燃料出入機はEVST床冷却系と接続することにより、使用済燃料の乾式洗浄を行う。また、洗浄後の使用済燃料を使用済燃料プールに移送中は裸燃料を直接冷却することにより除熱を行う。乾式洗浄については3.5節で記述し、ここでは洗浄後の使用済燃料を使用済燃料プールへ移送する際の除熱について検討した。

冷却ガス流路の寸法を表 3.3.3-5 に示す。また、燃料集合体圧力損失計算式を表 3.3.3-6、無駄流れの圧力損失計算式を表 3.3.3-7、熱伝達計算式を表 3.3.3-8 に示す。集合体内部を通過する有効冷却ガス流量と被覆管最高温度の関係を図 3.3.3-2 に示す。被覆管制限温度を350℃とする観点から、有効冷却ガス流量としては1.8Nm³/minとした。この時の温度分布を図 3.3.3-3 に示す。

有効冷却ガス流量と集合体外部を通過する無駄流れの関係を単体移送（1 集合体ポット）、複数体移送（2 集合体ポット）それぞれ図 3.3.3-4、図 3.3.3-5 に示す。有効冷却ガス流量を $1.8\text{Nm}^3/\text{min}$ とした場合は無駄流量はそれぞれ $2.8\text{Nm}^3/\text{min}$ 、 $4.2\text{Nm}^3/\text{min}$ と評価される。移送時のヒートマスバランスを図 3.3.3-6、図 3.3.3-7 に示す。移送時の設計仕様を以下に示す。設計仕様は余裕を考慮して流量は 1.2、圧力損失は 1.3 倍とした。

	単体移送	複数体移送
集合体内部流量	$1.8\text{Nm}^3/\text{min}$	$1.8\text{Nm}^3/\text{min}$
無駄流れ	$2.8\text{Nm}^3/\text{min}$	$4.2\text{Nm}^3/\text{min}$
必要流量	$4.6\text{Nm}^3/\text{min}$	$6.0\text{Nm}^3/\text{min}$
集合体部圧力損失	434mmAq	←
空気冷却器圧損	1000mmAq	←
その他圧損	400mmAq	←
圧損合計	1830mmAq	←
設計流量	$5.5\text{Nm}^3/\text{min}$	$7.2\text{Nm}^3/\text{min}$
設計差圧	2380mmAq	←

単体移送の場合と複数体移送の場合では集合体外部を流れる無駄流量が異なるため設計流量が異なるが設計流量の増加は 23%程度であることが明らかになった。

ただし、実際は乾式洗浄時の負荷の方が大きい（3.5 節参照）、冷却系機器の設計仕様は設計流量 $10\text{Nm}^3/\text{min}$ 、設計差圧 2600mmAq となる。平成 15 年度の燃料仕様および乾式洗浄に対応した冷却系仕様を考慮して、有効冷却ガス流量を $2.5\text{Nm}^3/\text{min}$ とし再評価した系統図およびヒートマスバランス図を図 3.3.3-8、図 3.3.3-9 に示す。

(5) まとめ

ナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントを対象としてレールレス方式燃料出入機冷却系の検討を行った。原子炉容器から EVST までのナトリウムポット取扱における移送系故障対応としての間接冷却系および EVST から使用済燃料プールまでの裸燃料の直接冷却系仕様を検討した。裸燃料直接冷却については移送時よりも 3.5 節で記述する乾式洗浄時の方が負荷が大きいことから乾式洗浄時の条件から仕様を設定した。

表 3.3.3-1 燃料出入機間接冷却系の検討条件 (平成 14 年度条件)

流路名称等	想定流路寸法	備考
1. 圧損計算用の直管換算流路長さ(1 集合体ポット)		
①配管 (4B: $\phi 114.3 \times t 3.0$)	8 m + 14m*	仕切弁、ベンド 8
②燃料出入機の間接冷却アニュラス部	$\phi 390 \times \phi 418 \times 7m$	
③配管	5m + 3.2m*	ベンド 2
④燃料出入位置上部アニュラス部	$\phi 390 \times \phi 418 \times 5m$	
⑤配管	5m + 3.2m*	ベンド 2
⑥燃料出入位置下部アニュラス部	$\phi 390 \times \phi 418 \times 15m$	
⑦燃料出入位置下部アニュラス部戻り部	$\phi 428 \times \phi 462 \times 5m$	
⑧配管	5m + 4.2m*	仕切弁、ベンド 2
2. 圧損計算用の直管換算流路長さ(2 集合体ポット)		
①配管 (6B: $\phi 165.2 \times t 3.4$)	8 m + 20m*	仕切弁、ベンド 8
②燃料出入機の間接冷却アニュラス部	$\phi 610 \times \phi 638 \times 7m$	
③配管	5m + 4.8m*	ベンド 2
④燃料出入位置上部アニュラス部	$\phi 610 \times \phi 638 \times 5m$	
⑤配管	5m + 4.8m*	ベンド 2
⑥燃料出入位置下部アニュラス部	$\phi 610 \times \phi 638 \times 15m$	
⑦燃料出入位置下部アニュラス部戻り部	$\phi 648 \times \phi 682 \times 5m$	
⑧配管	5m + 5.8m*	仕切弁、ベンド 2

注) 想定流路は流路長さが長い原子炉容器側を想定した

* : 仕切弁、ベンド部の等価圧力損失に相当する直管換算長さ

表 3.3.3-2 燃料出入機間接冷却系の集合体圧力損失計算式

項目及び内容
<p>①入口圧損（配管への入口）</p> $\Delta P = \zeta \cdot \rho \cdot V^2 / (2g)$ <p>ζ : 0.3、V : 配管内流速、ρ : 密度、g : 重力の加速度</p>
<p>②配管</p> $\Delta P = \lambda \cdot (L/d) \cdot \rho \cdot V^2 / (2g)$ <p>λ : 摩擦係数 ($\lambda = 0.3164 / Re^{0.25}$)</p> <p>$Re$: レイノルズ数 ($Re = v \cdot de / \nu$)</p> <p>de : 等価直径 ($de = 4 \cdot A / L$)</p> <p>A : 流路面積、L : 流路濡れぶち長さ、ν : 動粘性係数</p>
<p>③エルボ部</p> <p>ショートエルボを使用し、直管相当圧損は 15D の長さとする (火力発電必携による)</p>
<p>④弁部</p> <p>弁は仕切弁を想定し、直管相当圧損は 1 m の長さとする (火力発電必携に基づき設定)</p>
<p>⑤アニュラスへの流路拡大部</p> $\Delta P = \xi \cdot \rho \cdot (V_2 - V_1)^2 / (2g)$ <p>$\xi = 1$</p>
<p>⑥反転部</p> $\Delta P = \zeta \cdot \rho \cdot V^2 / (2g)$ <p>$\zeta = 1.35$</p>

表 3.3.3-3 燃料出入機間接冷却系のブロワ昇温計算式

項目及び内容
<p>①ブロワ昇圧に伴う温度上昇の算出方法</p> $\Delta T = T_{in} \cdot ((P_{in}/P_{out})^{(\kappa-1)/\kappa} - 1) / \eta$ <p>ΔT : ブロワの空気出入口温度差 (K)</p> <p>T_{in} : 入口温度 (K)</p> <p>P_{in} : 吸込み圧力 (Pa)</p> <p>P_{out} : 吐出圧力 (Pa)</p> <p>κ : 比熱比 (空気 : 1.4、Ar : 1.669)</p> <p>η : 断熱効率 (65%)</p> <p>なお、P_{out} は以下の条件とする (2割の余裕を考慮)</p> $P_{out} - P_{in} = 1.2 \cdot \Delta P$ <p>ΔP : 圧損計算により求めた値</p>
<p>②ブロワ必要軸動力</p> $A = (\kappa / (\kappa - 1)) \cdot (Q / 6120) \cdot ((P_{in}/P_{out})^{(\kappa-1)/\kappa} - 1) / \eta$ <p>Q : 吸込み流量 (m^3/min)</p> <p>P_{in}、P_{out}、κ、η は上記①と同様</p>

表 3.3.3-4 燃料出入機間接冷却系の圧力損失内訳

流路名称等	圧力損失 (mmAq)
1. 圧損計算用の直管換算流路長さ(1集合体ポット)	
①配管	182
②燃料出入機の間接冷却アニュラス部	95
③配管	64
④燃料出入位置上部アニュラス部	83
⑤配管	82
⑥燃料出入位置下部アニュラス部	173
⑦燃料出入位置下部アニュラス部戻り部	59
⑧配管	89
合計	826
設計圧力損失	1000
2. 圧損計算用の直管換算流路長さ(2集合体ポット)	
①配管	204
②燃料出入機の間接冷却アニュラス部	118
③配管	48
④燃料出入位置上部アニュラス部	102
⑤配管	62
⑥燃料出入位置下部アニュラス部	242
⑦燃料出入位置下部アニュラス部戻り部	68
⑧配管	67
合計	911
設計圧力損失	1100

表 3.3.3-5 燃料出入機直接冷却系の検討条件（平成 14 年度条件）

項目	寸法	単位	備考
1. 1集合体ポット移送概念			
(1)流れ経路			
・燃料集合体内有効流れ 案内管上部→グリッパ内→ 燃料集合体内→案内管下側			案内管:EVST出入案内管(以下同じ)
・燃料集合体外側無駄流れ 案内管上部→グリッパ外側→ 燃料集合体外→案内管下側			
			案内管とグリッパの間は 隙間2mmのアニユラス
(2)流路寸法(流路断面)			
案内管内径		370 mm	
ポット	外径	330 mm	
	HH外径	365 mm	
グリッパ	外径	366 mm	長さ900mmを想定(最大径部)
	内部孔径	50 mm	圧損に影響のある長さとして400mmを想定
燃料集合体ラッパ管	内対面距離	165 mm	
	外対面距離	175 mm	
燃料ピン	本数	271 本	
	径	8.5 mm	
	長さ	2935 mm	
	ピンピッチ	9.81 mm	
ワイヤスペーサ	径	1.26 mm	
	巻きピッチ	200 mm	
2. 2集合体ポット移送概念			
(1)流れ経路			
上記1の(1)に同じ			
(2)流路寸法(流路断面)			
案内管内径		590 mm	案内管とグリッパの間は
ポット	外径	528 mm	隙間2mmのアニユラス
	HH外径	580 mm	
グリッパ	外径	586 mm	長さ900mmを想定(最大径部)
	内部孔径	50 mm	圧損に影響のある長さとして400mmを想定
燃料集合体寸法については 上記1.(2)と同じ			

表 3.3.3-6 燃料出入機直接冷却系の集合体圧力損失計算式

項目及び内容	備考
<p>(1)燃料ピン束の圧損</p> $\Delta P = \lambda \cdot (L/d) \cdot \rho \cdot V^2 / (2g)$ <p>λ は MIT の式に基づき、下記の燃料集合体構造条件により設定</p> <p>燃料ピン 271 本</p> <p>ピン径 8.5mm</p> <p>ピンピッチ 9.81mm</p> <p>ワイヤスペーサ径 1.26mm</p> <p>ワイヤスペーサ巻き付けピッチ 200mm</p> <p>ラッパ管内対面距離 165mm</p> <p>層流遷移 Re 数 : 548.4</p> <p>乱流遷移 Re 数 : 12819.8</p> <p>層流域圧損係数 $\lambda = 78.88 / Re$</p> <p>乱流域圧損係数 $\lambda = 0.1685 / Re^{0.18}$</p> <p>層流から乱流の遷移域は内挿とする。</p> <p>(2)集合体の圧損</p> <p>燃料集合体全体の圧損は燃料ピン束の圧損の 4 / 3 倍と想定する。</p>	

表 3.3.3-7 燃料出入機直接冷却系の無駄流れ圧力損失計算式

項目および内容	
外部流れの圧損 f の計算法	
$f = H_{\text{拡大流}} + H_{\text{管内}} + H_{\text{縮流}} \quad [\text{m}]$	
$H_{\text{縮流}}$	$= \zeta \frac{v_2^2}{2g}$
$H_{\text{管内}}$	$= \lambda \frac{l}{de} \frac{v_2^2}{2g}$
$H_{\text{拡大流}}$	$= \xi \frac{(v_2 - v_3)^2}{2g}$
ただし、	
λ : 摩擦係数	$\frac{64}{\text{Re}}$ (層流域)
	$\frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}}$ (乱流域)
F :	流量
D_1 :	案内管内径 590mm
D_2 :	グリッパ径 586mm
a :	燃料集合体外対面距離 182.1mm
A_2 :	グリッパ外側面積 $\frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_2^2)$
A_3 :	燃料集合体外側面積 $\frac{\pi}{4}D_1^2 - \frac{\sqrt{3}}{2}a^2$
v_2 :	グリッパ外側流速 $\frac{F}{A_2}$
v_3 :	燃料集合体外側流速 $\frac{F}{A_3}$
l :	グリッパ長さ 900mm
de :	等価直径 $D_1 - D_2$
ζ :	損失係数 0.4
ξ :	損失係数 1.0
Re :	レイノルズ数 $\frac{v_2 de}{\nu}$
参考資料 : 機械工学便覧, A5-74~78, 1998, 丸善	

表 3.3.3-8 燃料出入機直接冷却系の集合体熱伝達計算式

項目及び内容
<p>(1)燃料ピン発熱対象部と発熱分布</p> <p>発熱部：燃料部 800mm（軸方向ブランケットは発熱無し）</p> <p>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）</p> <p>（271 ピンは高さ方向に同じ発熱分布）</p>
<p>(2)伝熱関連式</p> <p>$Re > 2320$</p> $Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$ <p>$Re < 2320$</p> $Nu = 4.36$
<p>(3)簡易計算方法</p> <p>簡易計算方法は以下のとおりとした。</p> <ol style="list-style-type: none"> ①冷却ガス量と燃料ピン発熱分布に基づきガス温度分布を設定 ②冷却ガス流量、温度に基づき熱伝達率を設定 ③燃料ピン発熱量、冷却ガス温度・熱伝達率に基づき被覆管温度を設定 <p>計算に際しては冷却ガス入口温度、圧力、流量に基づき順次下流側に圧力損失と温度変化を求めて、物性値の圧力・温度依存を考慮したものである。</p>

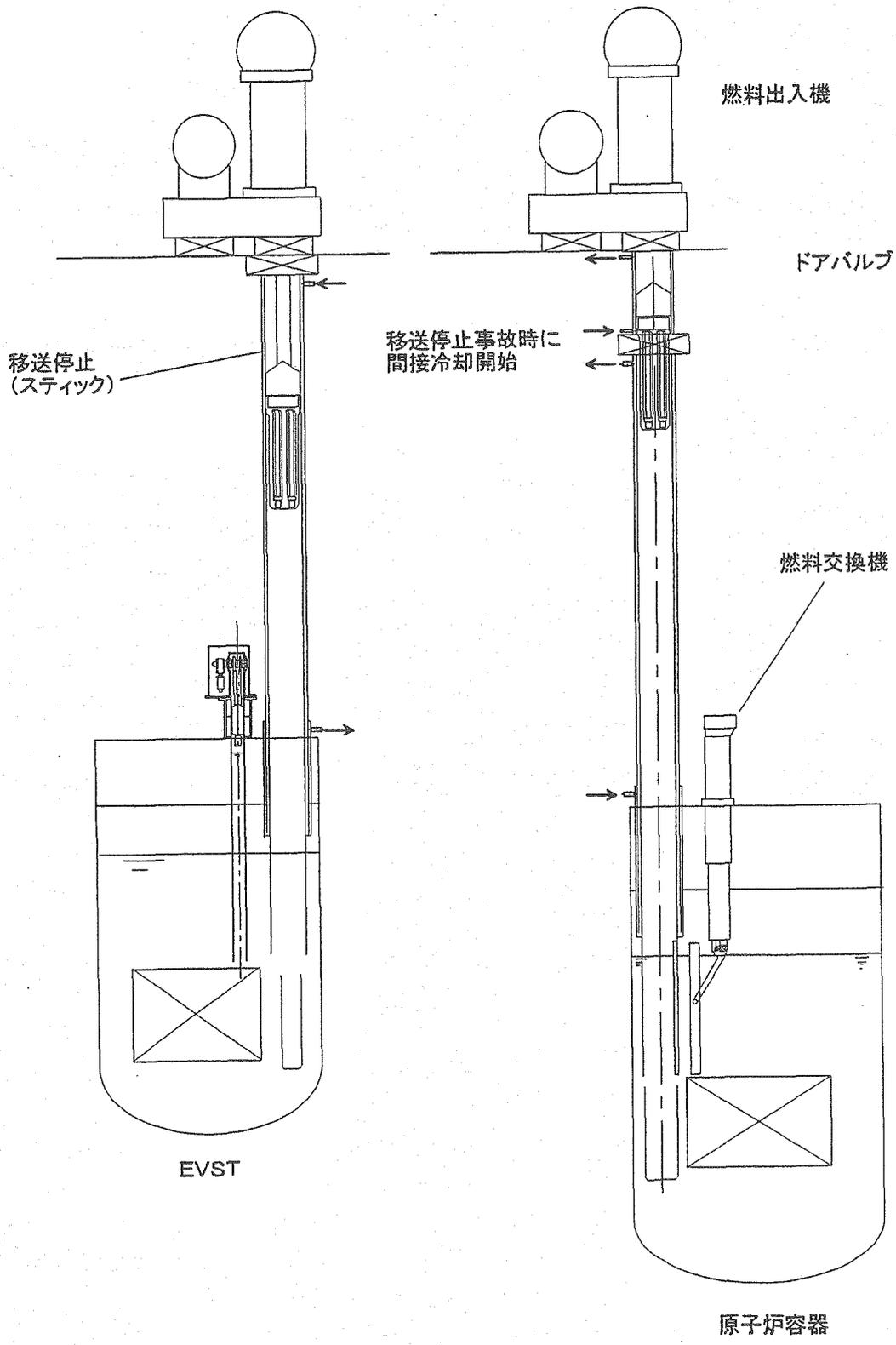


図 3.3.3-1 移送系故障時の燃料出入機による間接冷却概念図

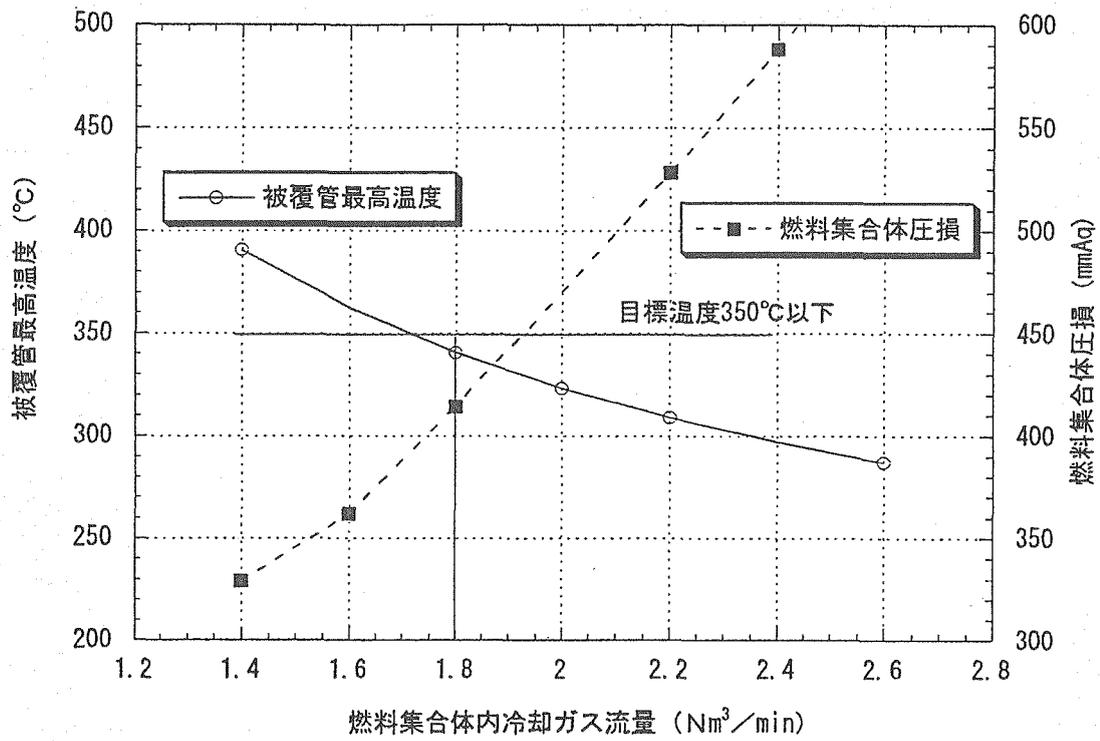


図 3.3.3-2 燃料出入機直接冷却時の被覆管最高温度 (移送時)

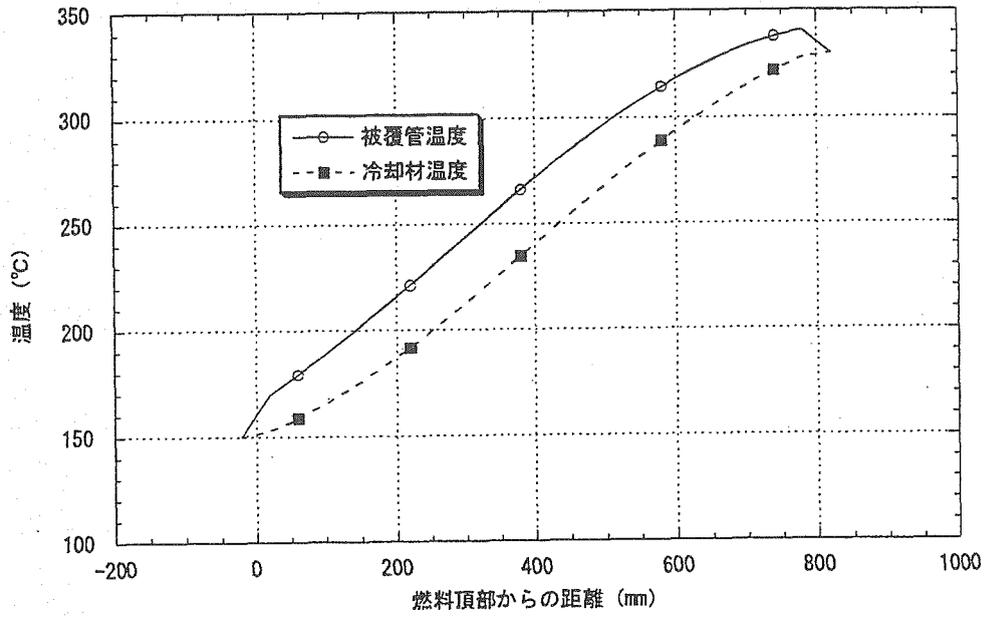


図 3.3.3-3 燃料出入機直接冷却時の被覆管温度分布 (移送時)

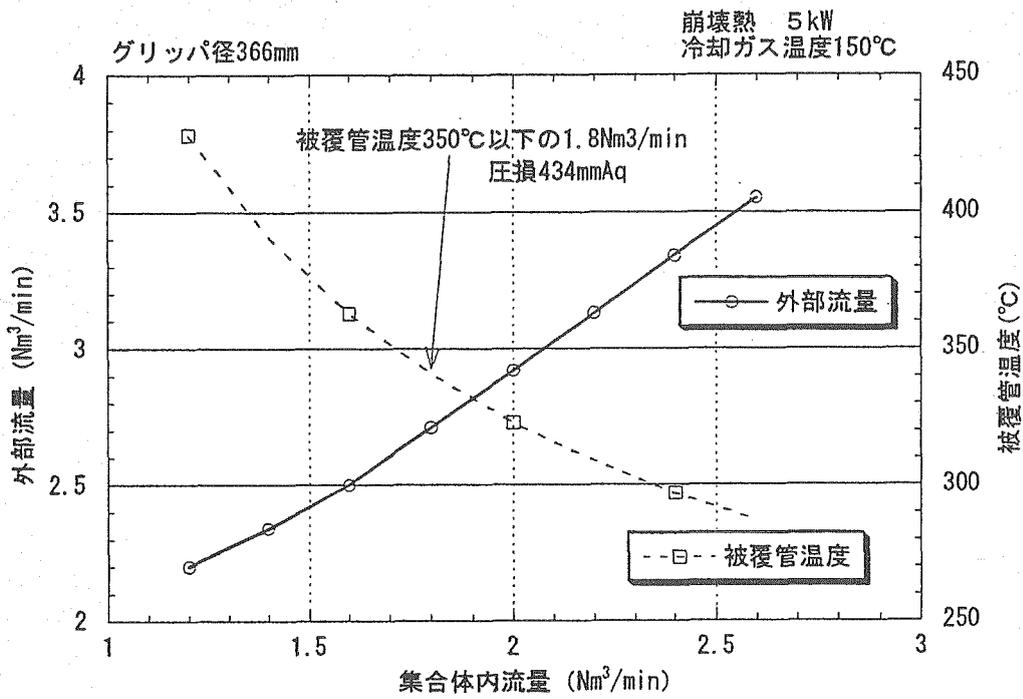


図 3.3.3-4 燃料出入機直接冷却時の流量評価 (移送時、単体移送)

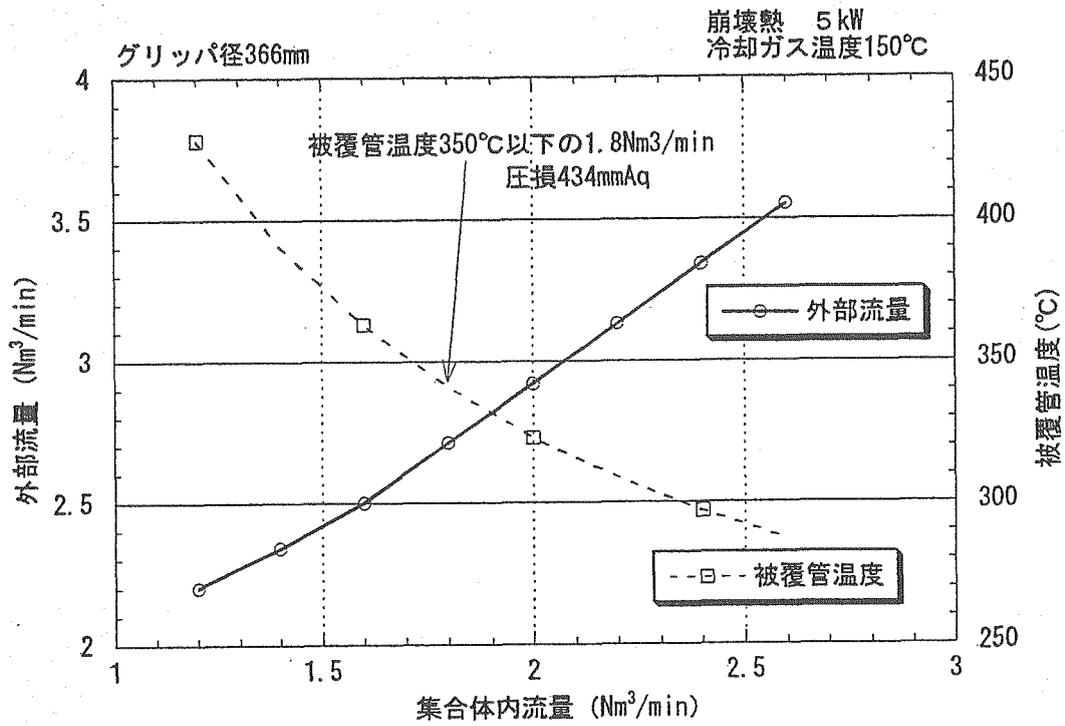


図 3.3.3-5 燃料出入機直接冷却時の流量評価 (移送時、複数体移送)

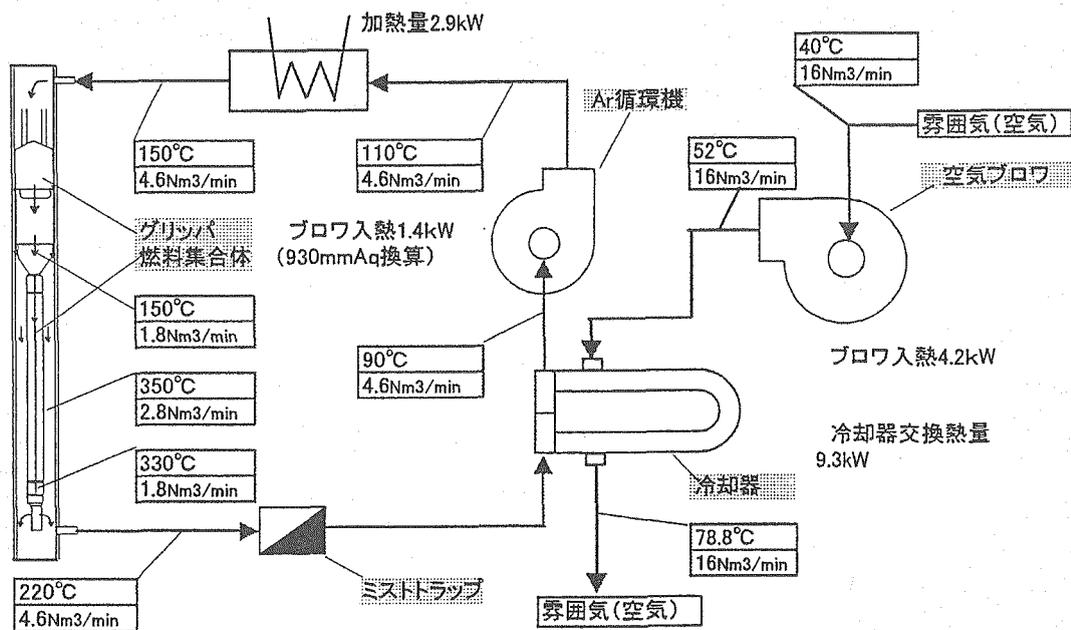


図 3.3.3-6 燃料出入機直接冷却時のヒートマスバランス (移送時、単体移送)

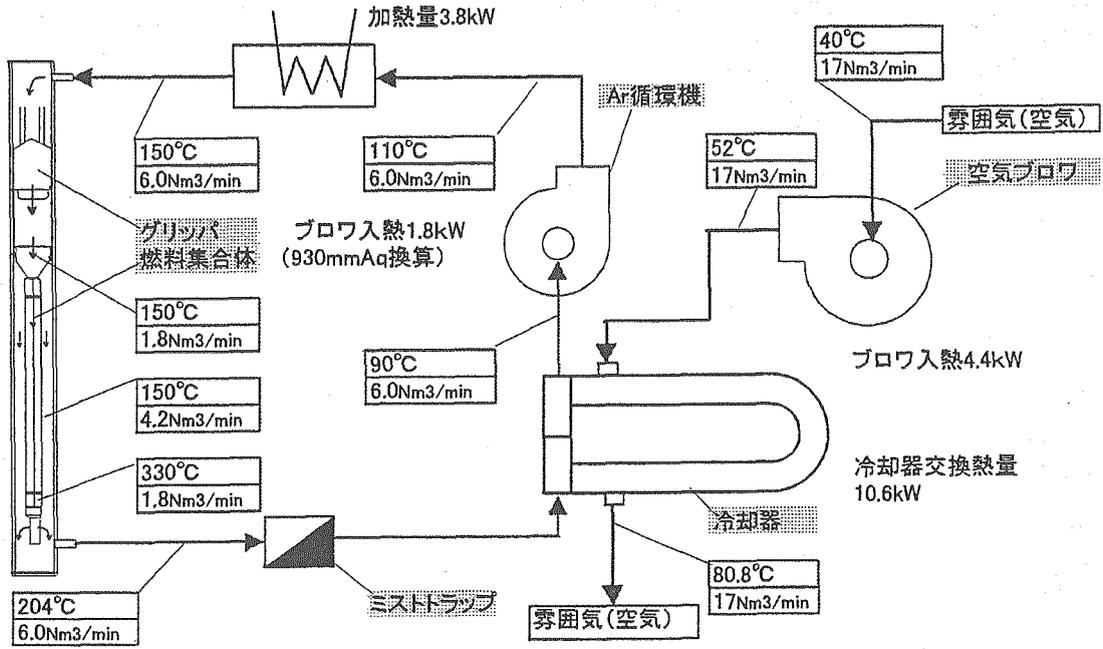


図 3.3.3-7 燃料出入機直接冷却時のヒートマスバランス(移送時、複数体移送)

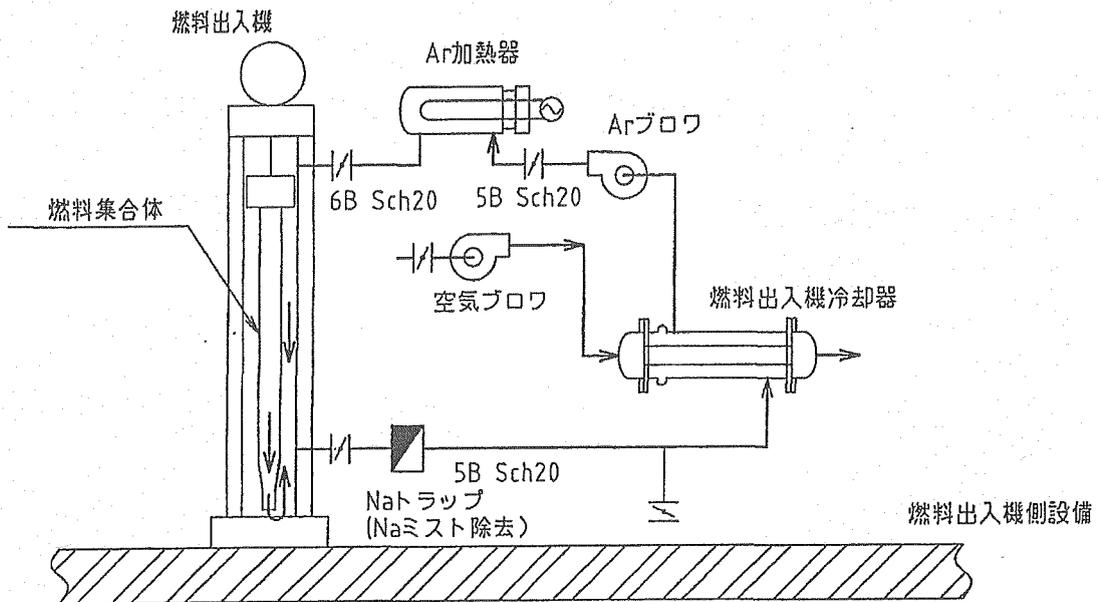


図 3.3.3-8 燃料出入機の直接冷却系統図 (移送時)

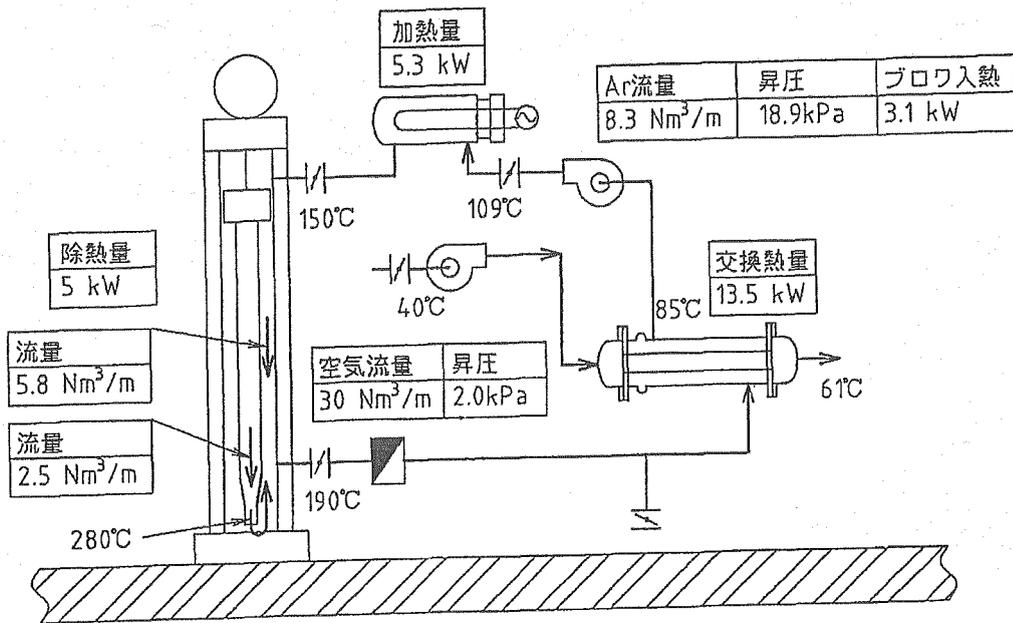


図 3.3.3-9 燃料出入機の直接冷却ヒートマスバランス（移送時、最終仕様）

3.4 炉外燃料貯蔵設備

3.4.1 貯蔵容量検討

(1) 概要

ナトリウム冷却中型炉における炉外燃料貯蔵設備（以下 EVST）の貯蔵容量の検討を行った。EVST 貯蔵方式では、EVST と使用済燃料プールを組み合わせて使用済燃料の減衰待貯蔵を行い、炉心退避対応を含めて各モジュール間での共用の考え方により、EVST 貯蔵容量が相違する。全貯蔵容量のうち、EVST 貯蔵容量が大きいケースでは、早期炉心対応が可能となる一方、物量およびコストが増加する傾向にある。以下では、経済性、炉心退避対応などの観点より、EVST 貯蔵容量を選定した。

(2) 検討条件

検討対象はナトリウム冷却中型炉とし、4モジュール1プラント構成とする。EVST では原子炉停止から減衰待貯蔵期間までの貯蔵を行い、使用済燃料の発熱量が減衰した後使用済燃料プールへ移送を行う。制御棒については使用済燃料プールに移送する際の中継貯蔵のため貯蔵期間は短期間であるとし、1モジュール分の28体の貯蔵容量のみを確保する。炉心退避については、炉心支持構造物などにクリープ疲労に起因する想定外のき裂を検知しても、低温停止すれば自重によりき裂が拡大し炉心が崩落する恐れはなく、炉心退避の発生頻度が極めて小さいこと（炉心退避後の対応も不明確）などを考慮して、炉心退避期間を要求条件としない。また、退避燃料の炉心への再装荷は要求しない。検討条件を以下に示す。

- ・燃料交換時取扱体数 : 使用済燃料 84 体、制御棒 28 体（1モジュール分）
- ・燃料交換時期の想定 : 4モジュール連続
- ・破損燃料体数 : 6 体（4モジュール分）
- ・減衰待貯蔵期間 : 470 日（5kW/体）または 640 日（4kW/体）
- ・原子炉運転期間 : 26ヶ月（791日）
- ・炉心退避体数 : 333 体

EVST と使用済燃料プールを合わせたプラント全体の貯蔵容量としては以下のように、プラント内に「4年冷却+1炉心退避+4年間の再処理設備故障」に相当する約5炉心分（=333体×5炉心+破損燃料6体=1671体）の貯蔵容量を確保した。

プラント内の貯蔵容量（5炉心+破損燃料6体）
 = 再処理待ちの4年冷却に対応する容量（=1燃料交換（1/4炉心）×燃料交換回数（2回）×4モジュール=2炉心）
 + 炉心退避（モジュール共用で1炉心）
 + 4年間の再処理設備故障を想定した容量（4年冷却と同じ2炉心）
 + 破損燃料6体

(3) 検討結果

EVST における減衰待ち貯蔵については、640 日 (4kW/体) または 470 日 (5kW/体) いずれの貯蔵を行ったとしても、原子炉運転期間 (791 日) より期間が短く、また原子炉運転期間の半分 (395 日) より大きいため、各モジュールにつき 1 バッチずつの貯蔵容量を確保することにより対応可能である。ただし、EVST の貯蔵容量は炉心退避に係る対応により、以下のように相違する。

- ・案 1 (EVST で燃料交換に必要な貯蔵容量のみ確保) : 合計 4 バッチ連続交換に相当する 370 体

EVST 貯蔵容量 (370 体)

= 制御棒を含めた 1 燃料交換バッチ (112 体)

+ 制御棒以外の 1 燃料交換バッチ (84 体) × 3 モジュール

+ 破損燃料 6 体

- ・案 2 (炉心退避が発生しても残りのプラント運転継続が可能) : 燃料交換 2 バッチ + 1 炉心退避に相当する 535 体
- ・案 3 (いずれのケースも早期炉心退避が可能) : 燃料交換 4 バッチ + 1 炉心退避に相当する 703 体

EVST 貯蔵容量をパラメータとする経済性および炉心退避期間の検討結果を表 3.4.1-1 に示す。燃料取扱設備の全体物量は、案 1 に対して、案 2 で 70ton (コスト 1.04 倍)、案 3 で 135ton (コスト 1.07 倍) 増加し、EVST 貯蔵容量の差異により有意なコスト差が発生する。炉心退避について、案 3 では、ダミー燃料準備を含めて約 70 日間で炉心退避を完了できる。一方、案 1 では、EVST 貯蔵中の使用済燃料を移動するなどの作業が必要で、炉心退避完了までに約 1 年間所要するが、仮設キャスクの使用や、燃料出入機の冷却容量の増加などの設計工夫により、早期炉心退避を実現できる可能性を有している。現状、炉心退避後の補修対応が不明確なこともあり、コスト最小の案 1 を EVST の概念検討 (EVST 本体および EVST 冷却系) の対象として選定する。また、要求条件でないが早期炉心退避の可能性に係る検討も 3.4.3 項で行った。

(4) まとめ

ナトリウム冷却中型炉における炉外燃料貯蔵設備 (以下 EVST) の貯蔵容量の検討を行った。現状は経済性を優先し 4 モジュールの連続燃料交換に対応する容量 (370 体) を確保する案 1 をレファレンスの貯蔵容量として選定した。炉心退避対応については燃料出入機の冷却容量の増加などの設計工夫による早期炉心退避の可能性を 3.4.3 項で検討することとした。

表 3.4.1-1 EVST貯蔵容量と経済性および炉心退避期間の関係

項目	案1(EVSTに必要な燃交分のみ確保)	案2(EVSTに炉心退避しても残りのプラント運転継続)	案3(EVSTへの早期炉心退避可能)
主要仕様	EVST 水プール 合計	535体 ²⁾ 1136体 1671体	703体 ³⁾ 968体 1671体
経済性	物量 水プール 燃料貯蔵系 燃料移送系 燃料処理系 合計 燃料貯蔵系 燃料取扱設備全体	670ton (EVST径φ8.05m) 305ton 975ton 370ton 55ton 1400ton 106.2 103.8	780ton (EVST径φ9.08m) 260ton 1040ton 370ton 55ton 1465ton 110.8 106.6
炉心退避期間 ⁵⁾	炉心退避モード ⁶⁾	440日(270日)	70日
炉心退避モード ²⁾	連続的に燃料交換 間隔を空けて燃料交換 連続的に燃料交換	465日(390日) 110日 470日(360日)	70日 70日 70日 70日
評価	炉心退避期間は約1年と長い が、燃料出入機冷却容量の増加 などにより早期炉心退避の可能 性有り。炉心退避後の補修対応 が不明確なこともあって、コスト 最小の案1を決定	-	-

注1) 合計4バッチの連続燃料交換に相当 注2) 燃料交換2バッチ+1炉心退避 注3) 燃料交換4バッチ+1炉心退避

注4) 案1を基準とする相対値

注5) 炉心退避決定後、炉心燃料のEVST、または、使用済燃料プールへの退避が完了するまで。かつこの内の数値は低燃焼度燃料(途中までしか燃焼していない燃料)を水プールに直接退避した場合の炉心退避期間

注6) 原子炉起動10日後に何らかの異常で原子炉停止。30日の検査後、炉心退避決定(EVSTに、燃交後の使用済燃料貯蔵中)

注7) 燃料交換開始前の炉内ISIで異常を発見し、炉停止15日後に炉心退避決定(EVSTに、燃料交換前の新燃料も貯蔵中)

3.4.2 臨界ピッチ評価

(1) 概要

ナトリウム冷却中型炉における EVST の臨界ピッチを評価した。貯蔵方式としては 2 段積段違い貯蔵および 1 段積貯蔵を検討した。

(3) 検討条件

解析コードとしてモンテカルロ法を用いた解析コード MCNP を用いた。従来評価では軸方向、水平方向とも無限に燃料が配列されていることを仮定するのが標準となっているが、ここでは解析評価手法の精度が向上していることを考慮して、有限体系として評価した。解析条件を表 3.4.2-1、計算体系を 2 段積段違い貯蔵について図 3.4.2-1、1 段積貯蔵について図 3.4.2-2 に示す。主要な検討条件を以下に示す。

- ・ 解析コード : MCNP (文献[8])
- ・ 評価方法 : モンテカルロ法
- ・ 核データライブラリ : JENDL-3.3
- ・ 燃料組成 : 保守的な条件として外側炉心新燃料を使用
- ・ 収納管 (案内管) : 燃料部のみ設置
肉厚 13mm
材質 SUS304
- ・ 冷却材 : ナトリウム
温度 300K
密度 0.844g/cm^3 (450°C相当)
- ・ 配列方式 : 正方配列 (2 段積段違い貯蔵)
: 三角配列 (1 段積貯蔵)
- ・ 貯蔵容量 (臨界評価用) : 675 体 (2 段積段違い貯蔵)
: 685 体 (1 段貯蔵)
- ・ 水平方向境界条件 : 無限配列
- ・ 垂直方向境界条件 : ナトリウム反射体 1.5m (密度 0.927g/cm^3)
- ・ 評価基準 : 中性子増倍率 0.94 以下 (不確かさとして 0.01 考慮)

(2) 検討結果

臨界ピッチと中性子増倍率の関係を 2 段積段違い貯蔵、1 段積貯蔵それぞれ図 3.4.2-3、図 3.4.2-4 に示す。評価基準である中性子増倍率 0.94 を満たす配列ピッチはそれぞれ 300mm、326mm と評価された。2 段積段違い貯蔵については収納管がない場合の臨界ピッチも評価した。評価基準である中性子増倍率 0.94 を満たす配列ピッチは 325mm と評価された。

参考までに 2 段積段違い貯蔵の軸方向ピッチによる影響を図 3.4.3-5 に示す。軸方向ピッ

ちに誤差が発生した場合においても数 mm の範囲であれば影響がほぼ無視できることが明らかになった。

設計で用いる EVST の配列ピッチは臨界ピッチに以下の製造公差、据付公差、その他不確かさを考慮する。

案内管内総偏り	: 10mm
寸法誤差	: 6mm
ラック変形等	: 2mm

以上の評価から臨界評価から要求される配列ピッチはそれぞれの貯蔵方式において以下の値となった。

2 段積段違い貯蔵方式	: 318mm (正方配列)
1 段積貯蔵方式	: 344mm (三角配列)
2 段積段違い貯蔵方式 (案内管なし)	: 343mm (正方配列)

ただし、2 段積段違い貯蔵方式において幾何学的に要求される配列ピッチが 325mm であるため、最終的な設計配列ピッチは以下で表される。

2 段積段違い貯蔵方式	: 325mm (正方配列)
1 段積貯蔵方式	: 344mm (三角配列)
2 段積段違い貯蔵方式 (案内管なし)	: 343mm (正方配列)

また、今回の臨界ピッチ評価の対象としていないが 1 段積段違い貯蔵方式を採用する場合は、軸方向の中性子漏れが増加するため 2 段積段違い貯蔵方式の値を用いることが可能であると考えられる。

(4) まとめ

ナトリウム冷却中型炉における使用済燃料プールの臨界ピッチをモンテカルロ法を用いた解析により評価した。最終的な設計配列ピッチは以下のように評価された。

2 段積段違い貯蔵方式	: 325mm (正方配列)
1 段積貯蔵方式	: 344mm (三角配列)
2 段積段違い貯蔵方式 (案内管なし)	: 343mm (正方配列)

また、今回の臨界ピッチ評価の対象としていないが 1 段積段違い貯蔵方式を採用する場合は、軸方向の中性子漏れが増加するため 2 段積段違い貯蔵方式の値を用いることが可能であると考えられる。

表 3.4.2-1 EVST 臨界ピッチ計算条件

	項目	単位	値	備考
燃料組成	理論密度	g/cm ³	11.0	
	スミア密度	%	82	
	プルトニウム同位体組成比	%	Pu238 = 1.1 Pu239 = 54.1 Pu240 = 32.1 Pu241 = 4.3 Pu242 = 3.9 Np237 = 0.5 Am241 = 2.0 Am243 = 1.0 Cm244 = 1.0 Cm245 = 0.0	解析では、Pu-238、Np-237、Am-241, 243、Cm-244, 245 は無視した。
	FP 混入率	Vol. %	2.0	
	プルトニウム富化度	wt%	(内側炉心) 19.3 (外側炉心) 23.0	
	ウラン濃縮度	%	0.3	
	軸ブランケット	理論密度	g/cm ³	10.96
スミア密度		%	91	
ウラン濃縮度		%		
被覆管	密度	g/cm ³	7.87	20°C
	組成	wt%	Mn = 0.6 Ni = 0.4 Cr = 11.0 Mo = 0.5 W = 2.0 Fe = 85.5	ODS 鋼
ラッパ管	密度	g/cm ³	7.87	20°C
	組成	wt%	Mn = 0.6 Ni = 0.4 Cr = 11.0 Mo = 0.5 W = 2.0 Fe = 85.5	PNC-FMS 鋼
幾何形状	被覆管内外径	mm	(内径) φ 8.98 (外形) φ 10.4	
	ラッパ管対面間距離	mm	(内面) 172.1 (外面) 182.1	
	スパーサワイヤ直径	mm	1.05	解析では無視した。
	炉心高さ	mm	1000	
	軸ブランケット高さ	mm	(上部) 300 (下部) 300	
	燃料ピン配列ピッチ	mm	11.51	
	燃料ピン数	ピン/SA	217 本	

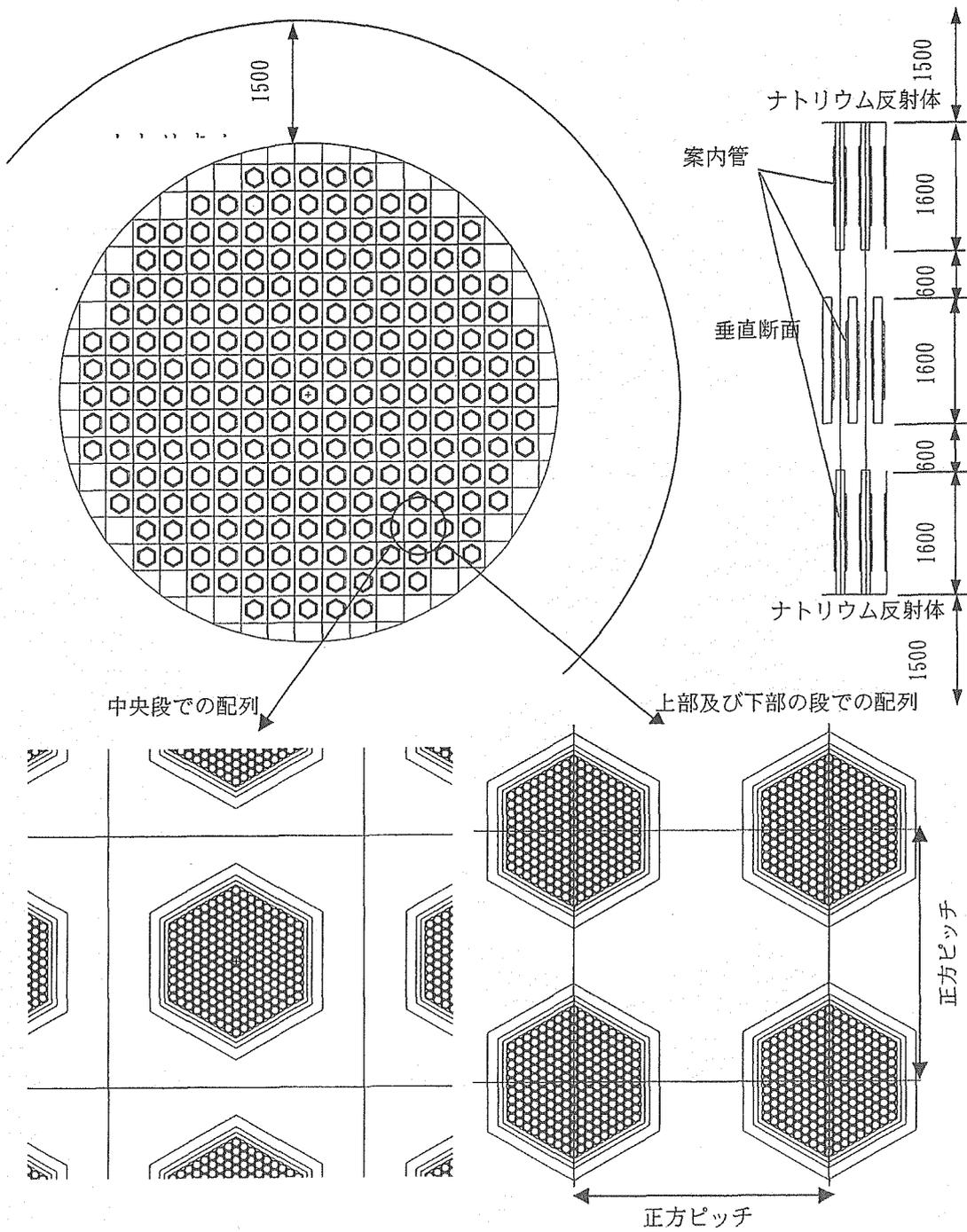


図 3.4.2-1 臨界計算体系 (EVST、2 段積段違い貯蔵)

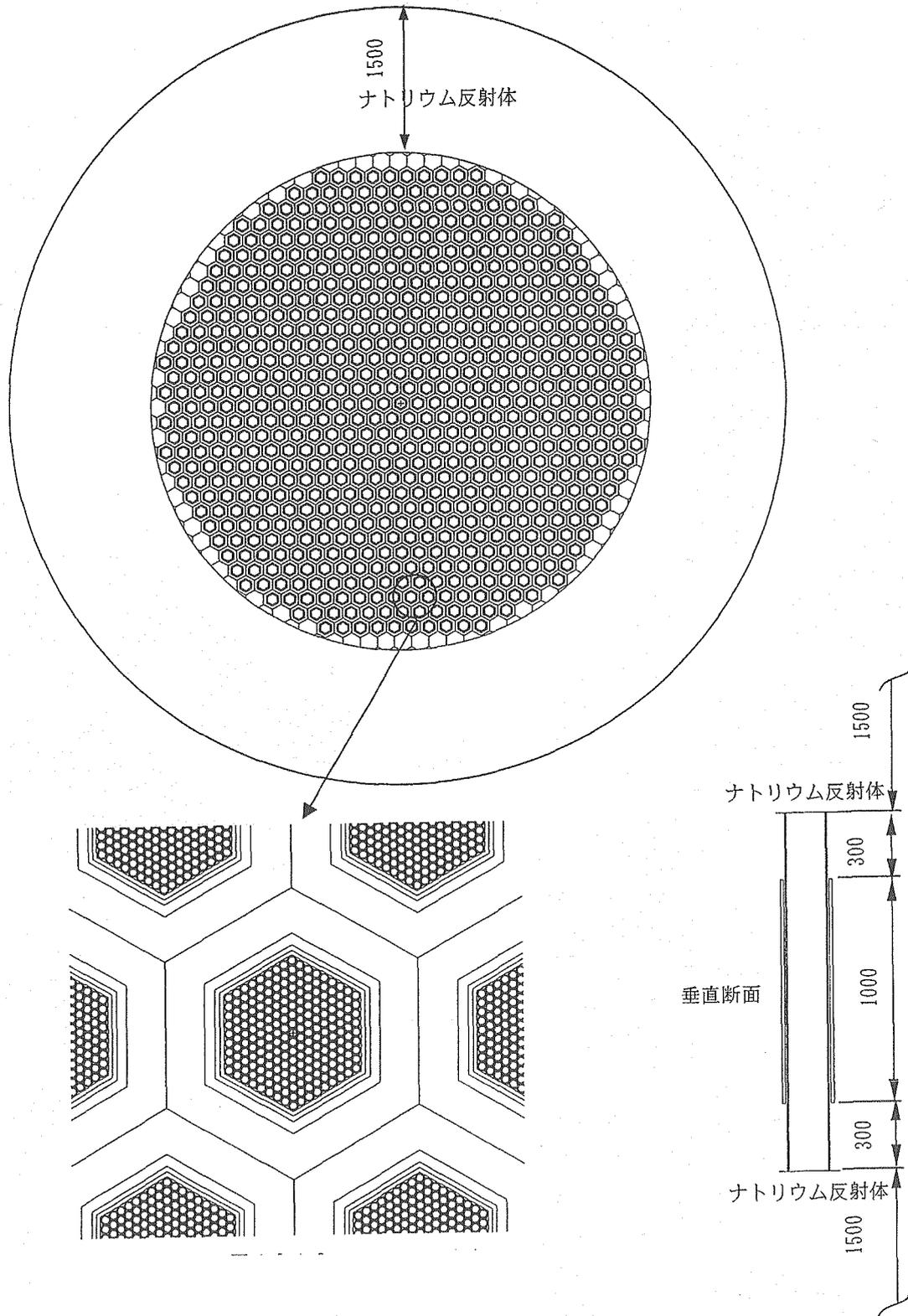


図 3.4.2-2 臨界計算体系 (EVST、1 段積貯蔵)

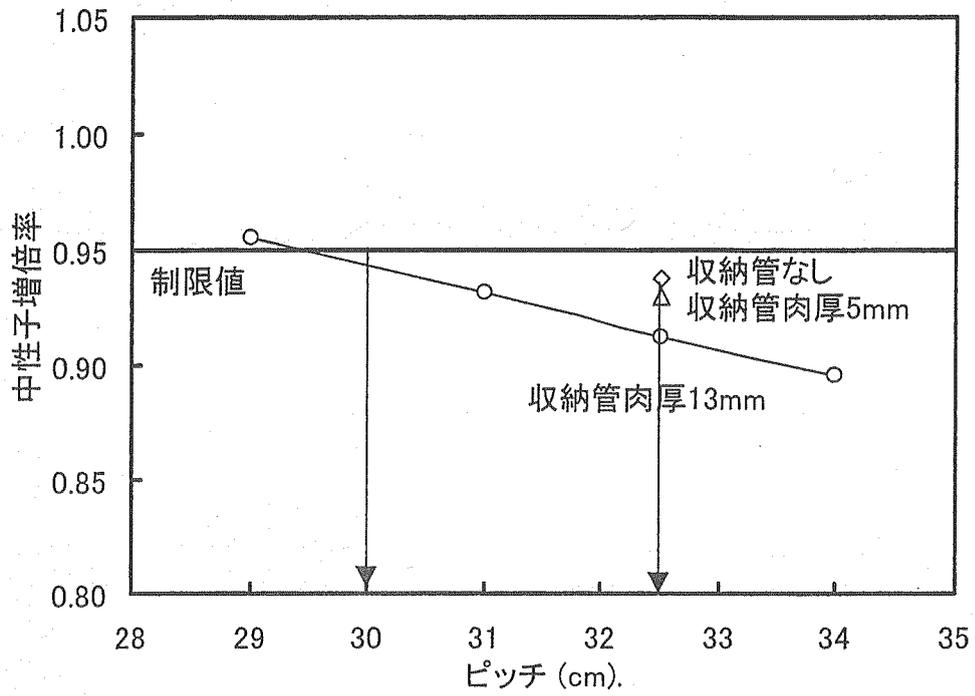


図 3.4.2-3 臨界計算結果 (EVST、2 段積段違い貯蔵)

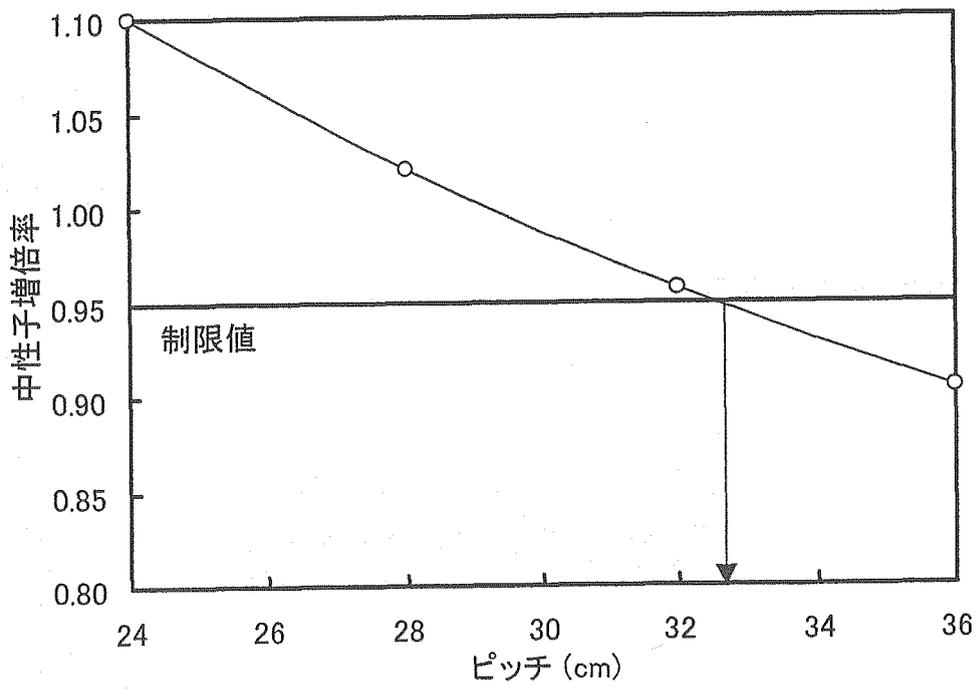


図 3.4.2-4 臨界計算結果 (EVST、1 段積貯蔵)

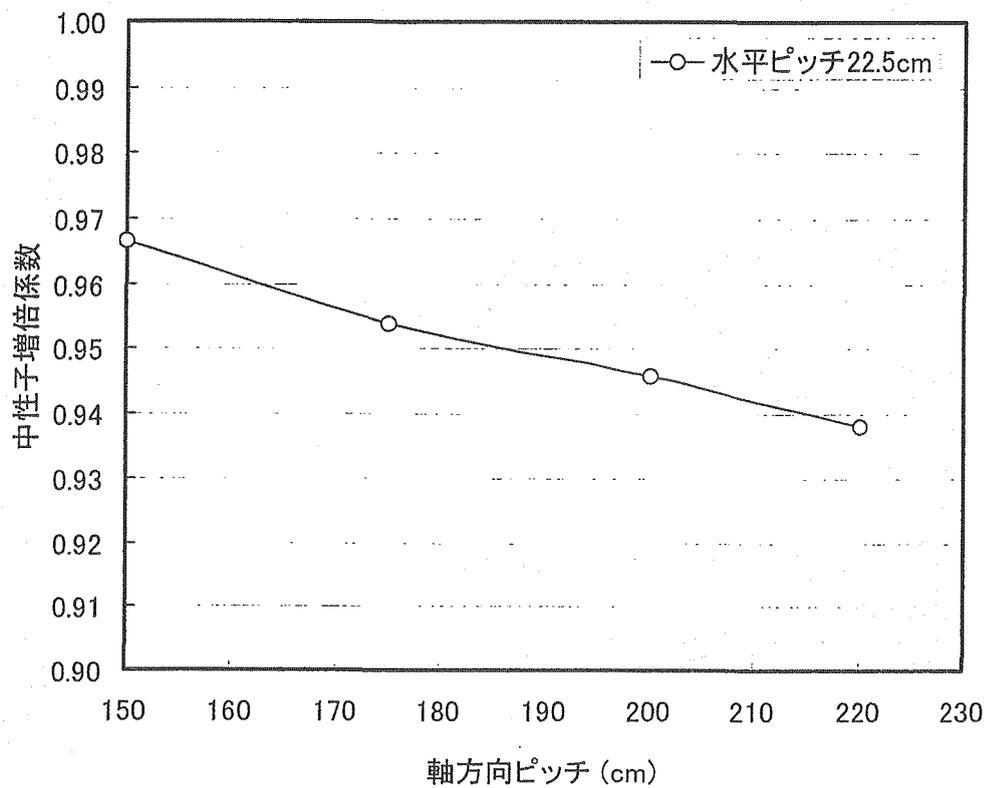


図 3.4.2-5 軸方向ピッチの影響評価 (案内管なし)

3.4.3 構造概念検討

(1) 概要

ナトリウム冷却中型炉の4モジュールプラントにおけるEVSTの構造概念を検討した。貯蔵容量については3.4.1項において検討した370体を前提として検討を行った。配列方式の比較によるEVSTのコンパクト化、液位制御型直動式槽内移送機の採用によるEVST容器軸長削減、3.4.3節で説明するEVST冷却系合理化にともなうナトリウム温度高温化対応が比較的容易な鋼製しゃへいプラグの採用の検討を行った。

(2) 検討条件

検討対象はナトリウム冷却中型炉の4モジュールプラントとし、4モジュールの連続燃料交換に対応するEVST貯蔵容量を確保している。検討条件を以下にまとめる。

- ・ EVST貯蔵容量 : 370体
- ・ ラップ管対面間距離 : 186.1mm
- ・ 集合体全長 : 4400mm
- ・ 照射後集合体湾曲量 : 25mm
- ・ 未臨界維持ピッチ : 318mm (段違い積案内管あり)
343mm (段違い積案内管なし)
- ・ 燃料移送ポット : $\phi 640\text{mm} \times L4690\text{mm}$ (2集合体ポット)

(3) 概念具体化

燃料1体の重金属インベントリの大きい高内部転換型炉心では、貯蔵ピッチが増加する恐れを有している。EVST中燃料の貯蔵ピッチに係る検討を表3.4.3-1に示す。貯蔵体系は、正方配列の二段積み段違い貯蔵方式、正方配列の段違い貯蔵方式および三角配列の単段貯蔵に区分される。正方配列の二段積み段違い貯蔵方式は、EVSTのコンパクト化が可能であるが、通常の燃料交換で下段位置を使用する場合に、運用上、下段燃料の取出し手順が複雑となるため、検討対象外とした。三角配列の単段貯蔵では、臨界回避の観点からピッチを小さくできず、燃料1体の占有面積が増加する傾向にある。一方、正方配列の段違い貯蔵方式では、案内管(各燃料の周囲に配置、六角形状)の有無による影響を検討した。案内管の有無により貯蔵ピッチが相違する。物量の比較評価を表3.4.3-2に示す。案内管あり379ton、案内管なし376tonと物量に大きな差異がないため、貯蔵ラック構造簡素化の観点より、案内管なしのケースを選択し、正方配列で343mmの貯蔵ピッチを確保した。

EVST容器の概念図を図3.4.3-1に示す。EVST容器は、内外容器(二重容器)、貯蔵ラック、遮へいプラグなどから構成される $\phi 6.86\text{m} \times h12.07\text{m}$ のナトリウム容器で、合計370体の貯蔵容量を有している。使用済燃料は裸状態で貯蔵し、回転ラック、ターンテーブル、槽内移送機を組み合わせ槽内燃料を移送する。

槽内移送機概念図を図3.4.3-2に、バウンダリ構成図を図3.4.3-3に示す。液面制御型

の直動式槽内移送機を採用して、ガス圧力制御により案内筒内にのみ移送燃料用のナトリウム液面を確保した。液面制御型移送機の採用により、EVST 軸長を約 3.5m、EVST 物量を約 43ton 低減 (EVST 全体で、物量約 7%、コスト約 6%の低減) することが可能である。高発熱燃料の取扱に伴い、万一のナトリウム液位喪失時には、短時間で燃料破損が発生する恐れを有するが、ガス空間部のバウンダリを二重化して、間隙部と外部圧力を均等に維持することにより、バウンダリ破損時にも、ナトリウム液位喪失は発生しない。

遮へいプラグ方式に係る検討結果を表 3.4.3-3 に示す。液面制御型移送機の採用に伴い、槽内移送機周囲の温度が上昇する傾向にある。また、3.4.3 項に記載するように、熱交換器の伝熱面積低減をねらって、ナトリウム高温化を計画しているため、従来の蛇紋岩コンクリート+熱遮へい板の構成に代えて、高温化対応が比較的容易な鋼製しゃへいプラグを採用した。ただし、遮へいプラグ搭載機器の作動性や、作業員のアクセス性にインパクトを及ぼす恐れを有しており、今後、遮へいプラグの温度評価や、シール部などの局所冷却対応を検討する必要がある。

(4) まとめ

ナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントに対する EVST 概念を具体化した。配列方式は案内管の有無で EVST 物量が多く変化しないため、構造の簡素な段違い積案内管なし方式を採用した。槽内移送方式については EVST 軸長削減が可能な液面制御型直動式槽内移送機の採用を検討した。また、3.4.3 節で説明する EVST 冷却系合理化に対応して高温化対応が比較的容易な鋼製しゃへいプラグの採用の検討を行った。

表 3.4.3-1 EVST中燃料の貯蔵ピッチ評価

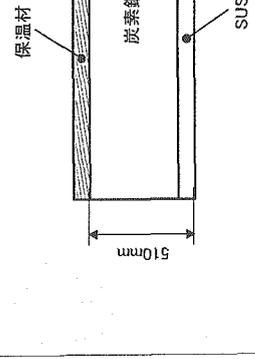
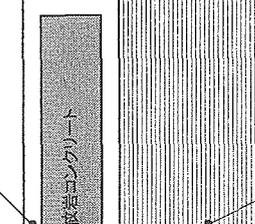
対象	貯蔵体系	配列	貯蔵ピッチ		燃料1体の占有面積 ⁴⁾
			臨界計算から決定 ²⁾	幾何学的配置から決定 ³⁾	
EVST	段違い貯蔵 ¹⁾ (案内管有り)	正方配列	318mm	325mm	52800mm ² /体
	段違い貯蔵 ¹⁾ (案内管なし)	正方配列	343mm	343mm	58800mm ² /体
水プール(参考)	単段貯蔵	三角配列	344mm	344mm	102500mm ² /体
	単段貯蔵	三角配列	258mm	235mm	57600mm ² /体

注1) 臨界計算は二段積み段違いの体系を対象としているため、段違い貯蔵体系では更に臨界ピッチが減少する可能性を有している。
 注2) 貯蔵方式によって、以下のように決定
 ・EVST: 臨界評価値+六角収納管内の総偏り(10mm)+寸法誤差(6mm)+ラック変形等(2mm)
 ・水プール: 臨界評価値+円筒収納管内の総偏り(20mm)+寸法誤差(6mm)+ラック変形等(2mm)
 ここで、臨界評価値は、EVSTの段違い貯蔵・正方配列(案内管有り)で300mm、(案内管なし)で325mm、単段貯蔵・三角配列で326mm、水プールの単段貯蔵・三角配列で230mmを使用
 注3) 貯蔵方式や、配列の相違により、以下のように決定
 ・EVST・正方配列: [(燃料対面間距離+案内管厚さ(13mm) × 2 + 案内管隙間(5mm) × 2 + リガメント厚さ(15mm)) × 2^{0.5} / cos15°]
 ・EVST・三角配列: 燃料対面間距離+案内管厚さ(13mm) × 2 + 案内管隙間(5mm) × 2 + リガメント厚さ(20mm)
 ・水プール・三角配列: 燃料対面間距離+案内管厚さ(5mm) × 2 + 案内管隙間(7.5mm) × 2
 注4) 正方配列は、段違い位置の燃料も含む

表3.4.3-2 案内管有無による段違い積貯蔵方式の比較

項目		案内管あり	案内管なし
EVST形状	貯蔵ピッチ	325mm(正方配列)	343mm(正方配列)
	形状	φ6.59m×h12.03m	φ6.86m×h12.07m
EVST物量	貯蔵容器	94ton	98ton
	貯蔵ラック	107ton	89ton
	遮へいプラグ	98ton	108ton
	外容器	60ton	62ton
	その他	20ton	19ton
	合計	379ton	376ton

表 3.4.3-3 EVST遮へいプラグ方式に係る検討結果

項目	鋼製ボックス+コンクリート遮へい方式	鋼製遮へい方式
基本構成		
概念図		
構成	鋼製ボックス+蛇紋岩コンクリート(γ線及び中性子遮へい)	鋼板(γ線及び中性子遮へい)
熱遮へい条件	SUS積層熱遮へい板 コンクリート下面で100°C(800mmのSUS積層熱遮へい板に相当) ¹⁾	遮へいプラグ下面で200°C
SUS物量 ²⁾	17 ton	4 ton
炭素鋼換算物量 ³⁾	7 ton	57 ton
技術課題	58 ton(他にコンクリート12ton) 特になし	遮へいプラグの高温化に伴い、搭載機器の作動性や、作業員のアクセシビリティに影響を及ぼす恐れ有り
備考	既往設計と同じ	-
評価	物量は鋼製遮へい方式と同程度であるが、遮へいプラグが厚くなるため、EVST大型化の恐れあり	技術課題を有するが、液位制御型槽内移送機の採用や、ナトリウム高温化に伴い、遮へいプラグ温度が上昇する傾向にあり、対応が容易

注1) 蛇紋岩コンクリートの採用に伴い、150°Cまで上昇可能

注2) 平成13年度のφ5.4m × h12.34mのEVSTに対する数値

注3) SUSの物量を3倍して、炭素鋼物量に加えた数値

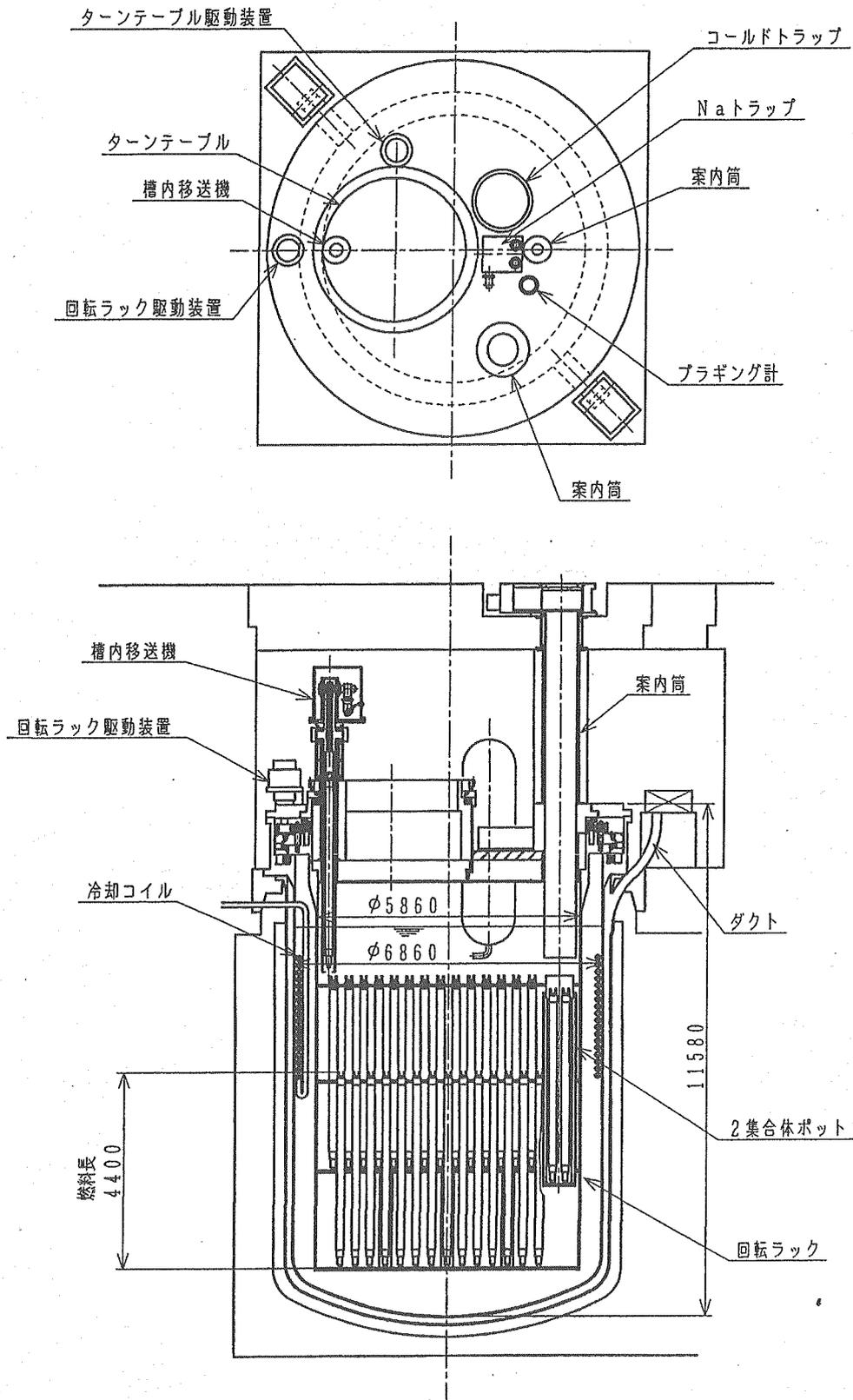


図 3.4.3-1 EVST 構造概念図

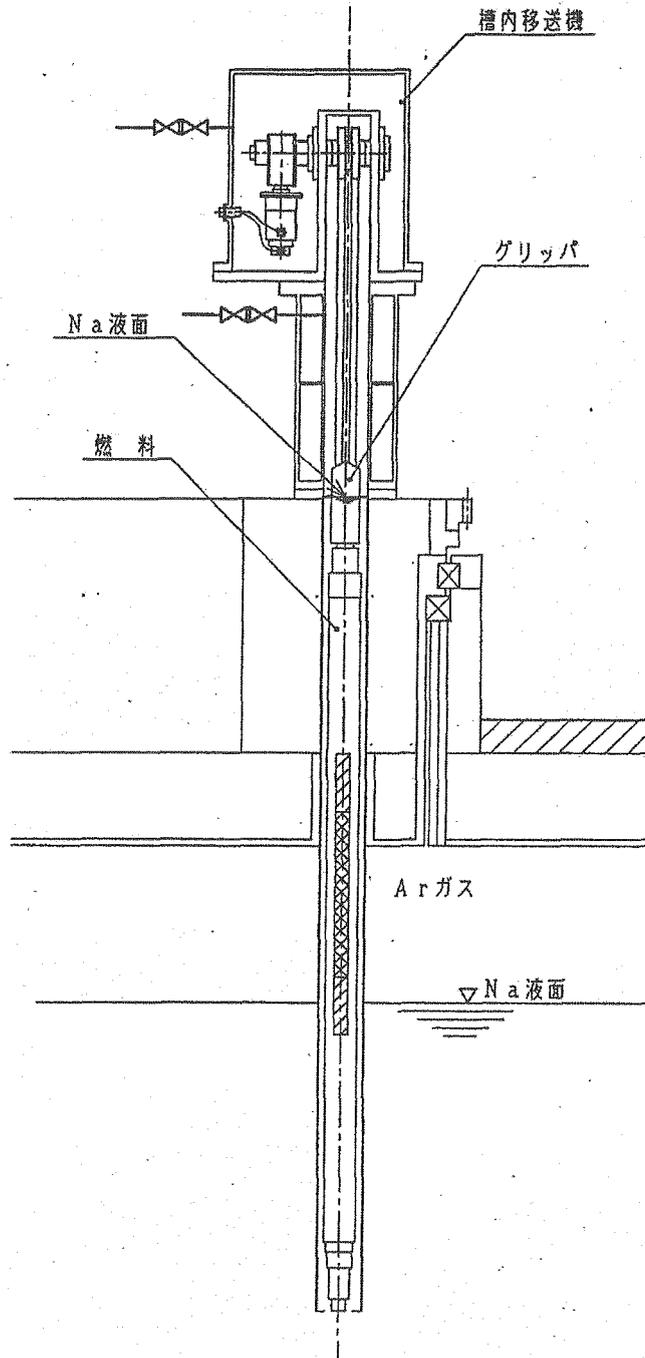


図 3.4.3-2 EVST 槽内移送機構造概念図

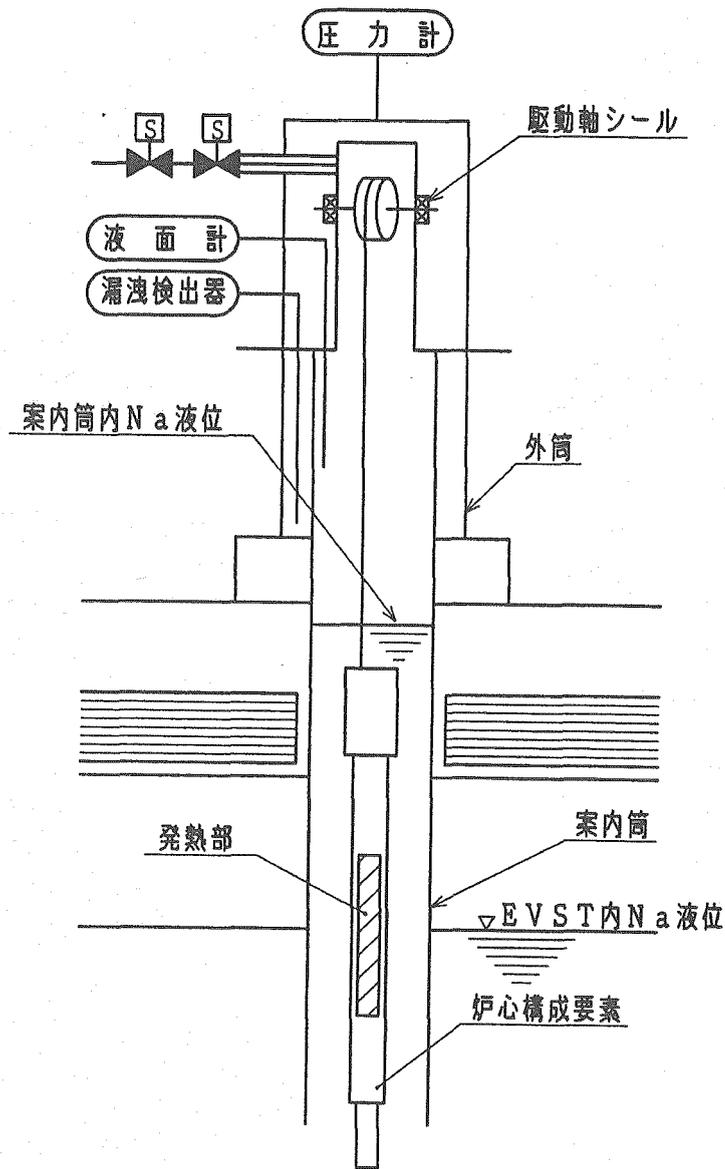


図 3.4.3-3 EVST 槽内移送機バウンダリ構成図

3.4.4 冷却系検討

(1) 概要

3.4.2項で検討したナトリウム冷却中型炉4モジュールプラントにおけるEVSTの冷却系の検討を行った。安全要求条件を満たす系統構成、必要除熱容量を検討し冷却系の具体化を行った。また、EVST冷却系におけるナトリウム漏えい時の対応をナトリウムバウンダリを2重化した場合について整理した。

(2) 検討条件

検討対象は3.4.2項で検討したナトリウム冷却中型炉4モジュールプラントとする。冷却系の検討条件を以下に示す。

- ・ 貯蔵容量 : 370 体
- ・ 燃料交換時取扱体数 : 使用済燃料 84 体、制御棒 28 体 (1モジュール分)
- ・ 燃料交換時期の想定 : 4モジュール連続
- ・ 除熱量 : 3.8MW (図 3.4.4-1 参照)
- ・ 冷却系系統構成 : 100%×3 系統

(3) 系統構成の検討

EVST冷却系の安全要求対応を表 3.4.4-1 に示す。ここでは 100%×3 系統の冷却系構成 (2 系統冷却+1 系統循環待機) が要求条件を満足していることを確認した。

通常運転時においては 1 系統の機能喪失+単一故障を重ね合せても、残りの 1 系統で冷却可能である。非常用ガスタービンの 2 系統化に対して、1 系統の EVST 冷却系は手動インターロックスイッチを設置し、いずれの非常用ガスタービンからも給電可能とした。万一の事故時には、運転員による電源切替えが必要であるが、EVST は、熱容量が大きく、温度上昇挙動が緩慢なため、十分な時間余裕を有していると考えられる。

ナトリウム冷却中型炉は 4 モジュールで EVST を共用するため、崩壊熱を常時除去しなければならず、1 系統点検時の対応を工夫する必要がある。表 3.4.4-1 に、1 系統点検時の安全要求対応も示したが、1 系統点検時に、1 系統の機能喪失+1 台の動的機器故障を重ね合せなどにより、冷却機能を喪失しても、崩壊熱の比較的低い時期に点検を実施すれば (モジュール運転間隔を均一とした条件で、0.65MW 以下の期間が約 60 日存在)、以下のように燃料被覆管の制限温度到達まで約 2 日間の時間余裕を有している。

$$\begin{aligned}
 & \cdot \text{除去すべき崩壊熱} = 0.65\text{MW} - 0.4\text{MW} (\text{自然循環による除熱量}) = 0.25\text{MW} \\
 & \cdot \text{燃料被覆管制限温度到達までの時間余裕}^{\text{注 1)}} \\
 & \quad = (450^\circ\text{C} - 280^\circ\text{C}) / (0.25\text{MW}/488\text{MJ}/^\circ\text{C}) \\
 & \quad = 3.32 \times 10^5 \text{ sec} \approx 3.8 \text{ 日}
 \end{aligned}$$

3 交替制の導入や、ナトリウムドレンしないで点検を実施するなどの工夫により、上記の 2 日間以内に点検系統の復旧は可能であるため、安全要求を満足していると判断した。

注 1) EVST 内ナトリウムが 280℃ (通常運転時) から 450℃ (貯蔵時の燃料被覆管制限温度 550℃に対応) まで上昇することを想定。また、488MJ/℃は燃料などを含めた EVST 熱容量。

(4) 冷却系仕様の検討

EVST 冷却系の構成図を図 3.4.4-2 に、基本仕様を表 3.4.4-2 に示す。EVST 冷却系は、EVST 中の崩壊熱を除去する直浸コイル内 2 次ナトリウム循環空冷式の冷却系で、槽内コイル、2 次ナトリウム系、空気冷却系から構成される。通常運転時は 3 系統のうち 2 系統を強制循環で運転し、残りの 1 系統は循環待機とする。このため通常運転時の 1 系統当たりの除熱容量は 1.9MW とした。事故時は 1 系統機能喪失+単一故障を想定して 1 系統による 100%除熱を想定して、事故時の高温運転モードにおいては 1 系統のみで 3.8MW の除熱容量を確保した。主要機器である 2 次ナトリウム系電磁ポンプ、空気冷却器、空気冷却器送風機の仕様を表 3.4.4-3~5 に示す。また、空気冷却器の構造概念図を図 3.4.4-3 に示す。

EVST 冷却系のヒートマスバランスを通常運転時、事故時、自然循環時を図 3.4.4-4~6 に示す。高温化による熱交換器の伝熱面積低減をねらって、事故時に相当する 1 系統冷却時に槽内ナトリウム温度が約 450℃となるようにした。本設計対応により、EVST 冷却系コストを約 20%低減 (動的機器コストは同じと仮定) することが可能である。また、ナトリウム配管、空気冷却器伝熱管のいずれも 2 重構造 (間隙部は窒素雰囲気) として、ナトリウム燃焼火災の影響を緩和した。プラント側とのナトリウム燃焼火災対応の比較を表 3.4.4-6 に整理した。

(5) まとめ

3.4.2 項で検討したナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントにおける EVST の冷却系の検討を行った。安全要求条件を満たす系統構成として 100%×3 系統を選定し、通常時は 2 系統強制冷却、1 系統循環待機として主要機器仕様およびヒートマスバランスの検討を行った。事故時については 1 系統強制循環による冷却を想定し EVST 槽内のナトリウム温度が 450℃となるように設定した。また、EVST 冷却系におけるナトリウム漏えい時の対応をナトリウムバウンダリを 2 重化した場合について整理を行った。

表 3.4.4-1 EVST冷却系の安全要求対応

通常運転時 事象区分	起因事象	単一故障	事象の推移
通常 運転時の異常な過渡変化 <small>(注1)</small>	-	-	2系統強制循環冷却+1系統循環待機
	動的機器1台のトリップ	+残りの常用システムの動的機器1台のトリップ	待機システムの起動により、2系統強制循環冷却
	外部電源喪失	+待機システム(ブロワ)の起動失敗	待機システムの起動により、1系統強制循環冷却
		+非常用ガスタービンの起動失敗	非常用ガスタービンからの給電により、2系統強制循環冷却の立上げ
事故時	1系統機能喪失+外部電源喪失	+動的機器(ブロワ、電磁ポンプ)の起動失敗	手動インターロックスイッチの切り替えにより、2系統強制循環冷却(切り替えなしでも1系統強制循環冷却)
		+非常用ガスタービンの起動失敗	待機システムの起動により、2系統強制循環冷却
		+動的機器(ブロワ、電磁ポンプ)の起動失敗	手動インターロックスイッチの切り替えにより、1系統強制循環冷却
		+静的機器の故障	1系統強制循環冷却

1系統点検時 事象区分	起因事象	単一故障	事象の推移
通常 運転時の異常な過渡変化	-	-	2系統強制循環冷却
	動的機器1台のトリップ	+残りの常用システムの動的機器1台のトリップ	EVST熱容量に期待して、制限温度到達前に、点検システムを起動
	外部電源喪失	+非常用ガスタービンの起動失敗	1系統強制循環冷却
	1系統機能喪失+外部電源喪失	+非常用ガスタービンの起動失敗	EVST熱容量に期待して、制限温度到達前に、点検システムを起動
事故時	1系統機能喪失	+静的機器の故障	EVST熱容量に期待して、制限温度到達前に、点検システムを起動(静的機器の故障は1か月後に重ね合わせれば良く、その間に点検システムを起動)

注1)EVST冷却系と非常用ガスタービンの接続は、常用システムA-非常用ガスタービンa、常用システムB-非常用ガスタービンa、常用システムC-非常用ガスタービンa、又は、b(手動インターロックスイッチで切り替え可能)

表3.4.4-2 EVST冷却系の基本仕様

大項目	項目	仕様
型式		直浸コイル内2次ナトリウム循環空冷式
系統数		3系統
冷却容量(通常時)	(通常時)	1.9MW/系統
	(事故時)	3.8MW/系統
運転方式	(通常時)	2系統強制冷却運転、1系統循環待機
	(事故時)	1系統強制冷却運転を想定
2次ナトリウム系	流量	85ton/h
	温度(通常時)	193/253°C
	温度(事故時)	275/398°C
空気冷却系	流量(通常時)	49ton
	流量(事故時)	66ton
	温度(通常時)	40/178°C
	温度(事故時)	50/245°C
機器区分	EVST内冷却管	第3種機器
	2次ナトリウム系配管・機器	第4種機器
	空気冷却系配管・機器	第4種機器相当
耐震クラス	冷却系配管・機器	As
	エンクロージャ	C(S2)

表3.4.4-3 EVST冷却系のナトリウム循環ポンプ仕様

項目	単位	仕様
型式	-	リニアインダクション型電磁ポンプ
基数	基	3
流量	t/h	85
揚程	mNa	20
電気容量	kVA	60
絶縁種別	-	C種
機器種別	-	その他のポンプ
耐震クラス	-	As

表3.4.4-4 EVST冷却系の空気冷却器仕様

項目	単位	仕様
型式	-	強制通風方式
基数	基	3
除熱容量	MW	3.8
伝熱面積	m ²	403
主要寸法	m	2.25x2.25x3
機器種別	-	機器区分外、バウンダリは第4種
耐震クラス	-	As

表3.4.4-5 EVST冷却系の送風機仕様

項目	単位	仕様
型式	-	翼型片吸込直結型
基数	基	3
流量	m ³ /h	53000
静圧	kPa	4
制御方式	-	電動式ベーン、回転数制御
機器種別	-	機器区分外
耐震クラス	-	As

表 3.4.4-6 EVST におけるナトリウム漏えい対策

項目	2次系配管 (CV内)	2次系配管 (CV外)	DHRS配管 (CV内)	DHRS配管 (CV外)	DHRS 空気冷却器	EVST 2次系配管	EVST 空気冷却器
配管口径	32B, 44B	32B, 44B	12B, 8B	12B	ヘッド 12B	4B	ヘッド 6B
エンクロージャ構造	溶接構造、炭素鋼 コールド設計 (保温材を内側設置) 低温ペロローズ (SUS) 設置	分別フランジ構造+リップ シールド構造、炭素鋼 コールド設計 (保温材を内側設置) 低温ペロローズ (SUS) 設置	溶接構造、12Cr 鋼 ホット設計 (保温材を外側設置) 高温ペロローズ (12Cr 鋼) を指向	同左	フィン付 2重伝熱管 (密着 2重管)、12Cr 鋼 リ字管、ヘッドはエンクロージャ、炭素鋼 ホット設計 (保温材を外側設置) ダクト下部にナトリウム貯留装置設置	溶接構造、SUS コールド設計 (保温材を外側設置) 低温ペロローズ (SUS) 必要に応じて設置	フィン付 2重伝熱管 (密着 2重管)、SUS リ字管、ヘッドはエンクロージャ、炭素鋼 コールド設計 (保温材を外側設置) ダクト下部にナトリウム貯留装置設置
区画化と配管サポート	仕切り構造を介して配管をサポート	同左	仕切り構造を介して配管をサポート	同左	伝熱管毎には区画化しない	仕切り構造を介して配管をサポート	伝熱管毎には区画化しない
雰囲気	窒素ガス ナトリウム燃焼抑制及びエンクロージャ、配管の腐食防止	同左	窒素ガス ナトリウム燃焼抑制及びエンクロージャ、配管の腐食防止	同左	同左	窒素ガス ナトリウム燃焼抑制及びエンクロージャ、配管の腐食防止	同左
漏えい検出器	区画内のガスサンプリングによる切り替えによる検出 区画毎に接触式検出器の設置	区画毎に SID、レーザ式検出器を設置 区画毎に接触式検出器の設置	区画内のガスサンプリングによる切り替えによる検出 区画毎に接触式検出器の設置	区画毎に SID、レーザ式検出器を設置 区画毎に接触式検出器の設置	エンクロージャ、空気ダクトに SID、レーザ式検出器を設置 エンクロージャ、ナトリウム貯留装置接触式検出器の設置	区画毎に SID、レーザ式検出器を設置 区画毎に接触式検出器の設置 エンクロージャ、ナトリウム貯留装置接触式検出器の設置	エンクロージャ、空気ダクトに SID、レーザ式検出器を設置 エンクロージャ、ナトリウム貯留装置接触式検出器の設置
予熱方式	ガス予熱	同左	エンクロージャ外部に予熱ヒータ設置	同左	エンクロージャ外部に予熱ヒータ設置	エンクロージャ外部に予熱ヒータ設置	エンクロージャ外部に予熱ヒータ設置
エンクロージャ安全クラス	MS-2 C/N の隔離機能に影響を及ぼさないように、漏えいナトリウムの燃焼抑制	MS-3 DHRS に影響を及ぼさないように、漏えいナトリウムの燃焼抑制	MS-2 C/N の隔離機能に影響を及ぼさないように、漏えいナトリウムの燃焼抑制	MS-3 DHRS の機能に影響を及ぼさないように、漏えいナトリウムの燃焼抑制	MS-3 DHRS の機能に影響を及ぼさないように、漏えいナトリウムの燃焼抑制	MS-3 EVST 冷却系の機能に影響を及ぼさないように、漏えいナトリウムの燃焼抑制	MS-3 EVST 冷却系の機能に影響を及ぼさないように、漏えいナトリウムの燃焼抑制
エンクロージャ機器区分	4種管 雰囲気圧力がかかり、0MPa を超える	4種機器相当	4種管 雰囲気圧力がかかり、0MPa を超える	同左	同左	4種管相当	4種機器相当
エンクロージャ耐震クラス	C(S ₂) C/N パウンダリに影響を及ぼさないように、S ₂ チェック	C	C(S ₂) C/N パウンダリに影響を及ぼさないように、S ₂ チェック	C(S ₂) DHRS に影響を及ぼさないように、S ₂ チェック	C(S ₂) DHRS の影響を及ぼさないように、S ₂ チェック	C(S ₂) EVST 冷却系の機能に影響を及ぼさないように、S ₂ チェック	C(S ₂) EVST 冷却系の機能に影響を及ぼさないように、S ₂ チェック

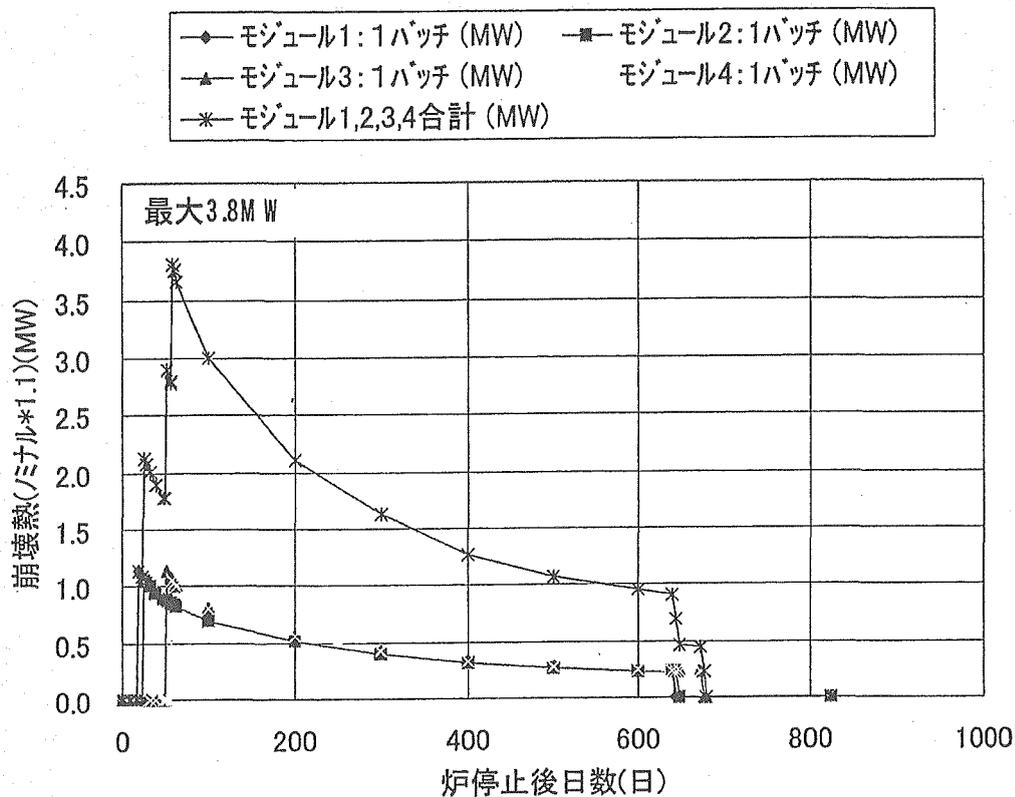


図 3.4.4-1 (1/2) EVST 所熱容量の検討 (4kW/体取出)

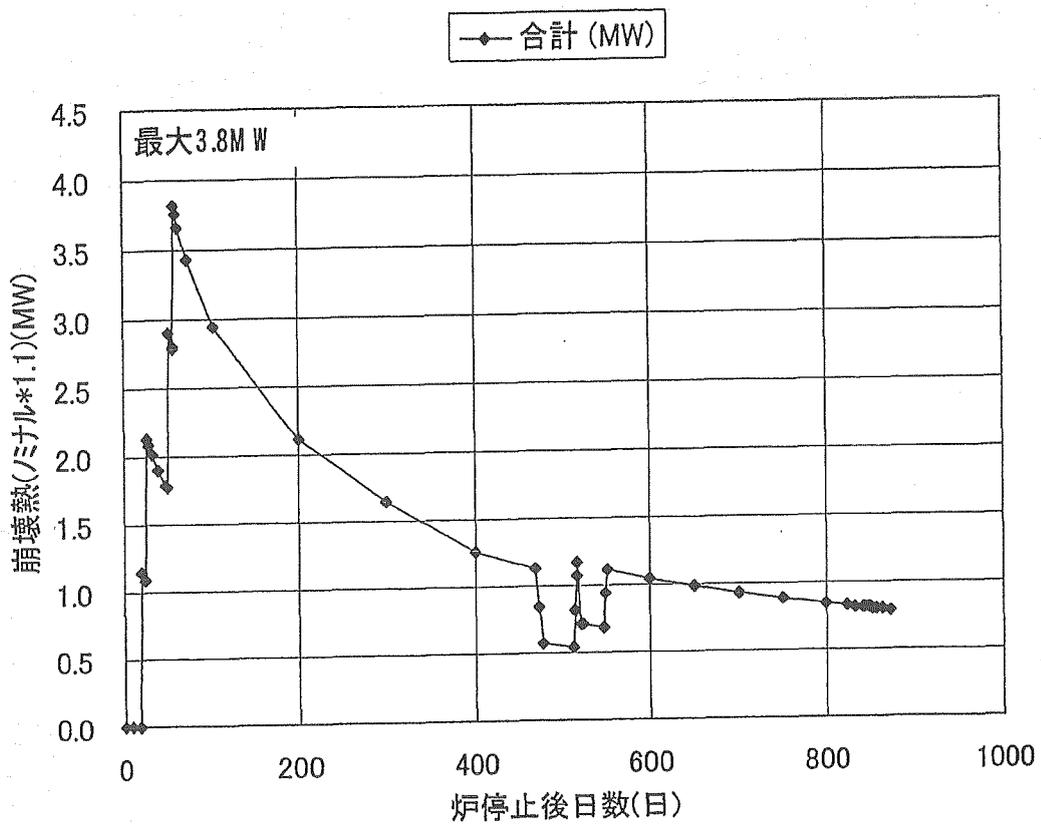


図 3.4.4-1 (2/2) EVST 所熱容量の検討 (5kW/体取出)

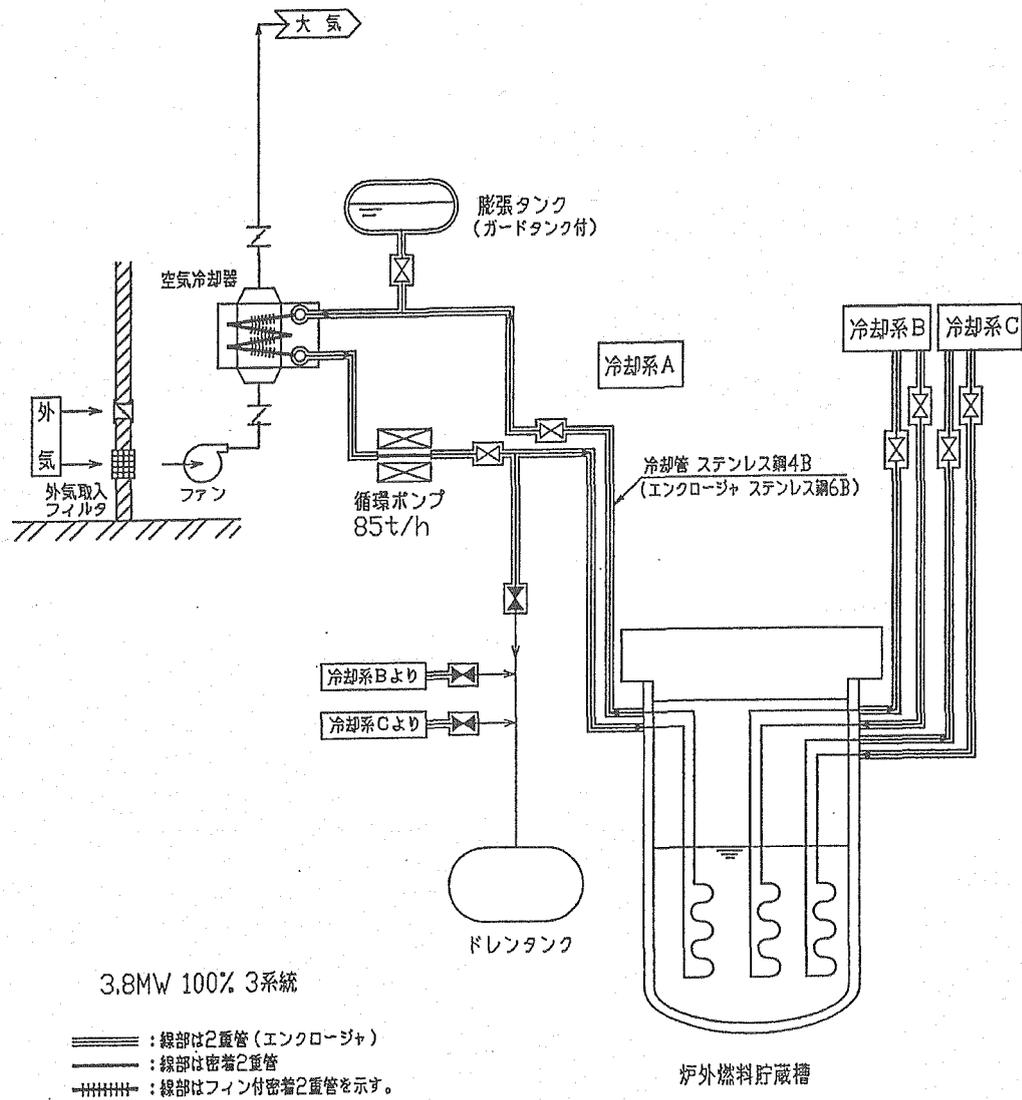


図 3.4.4-2 EVST 冷却系系統構成図

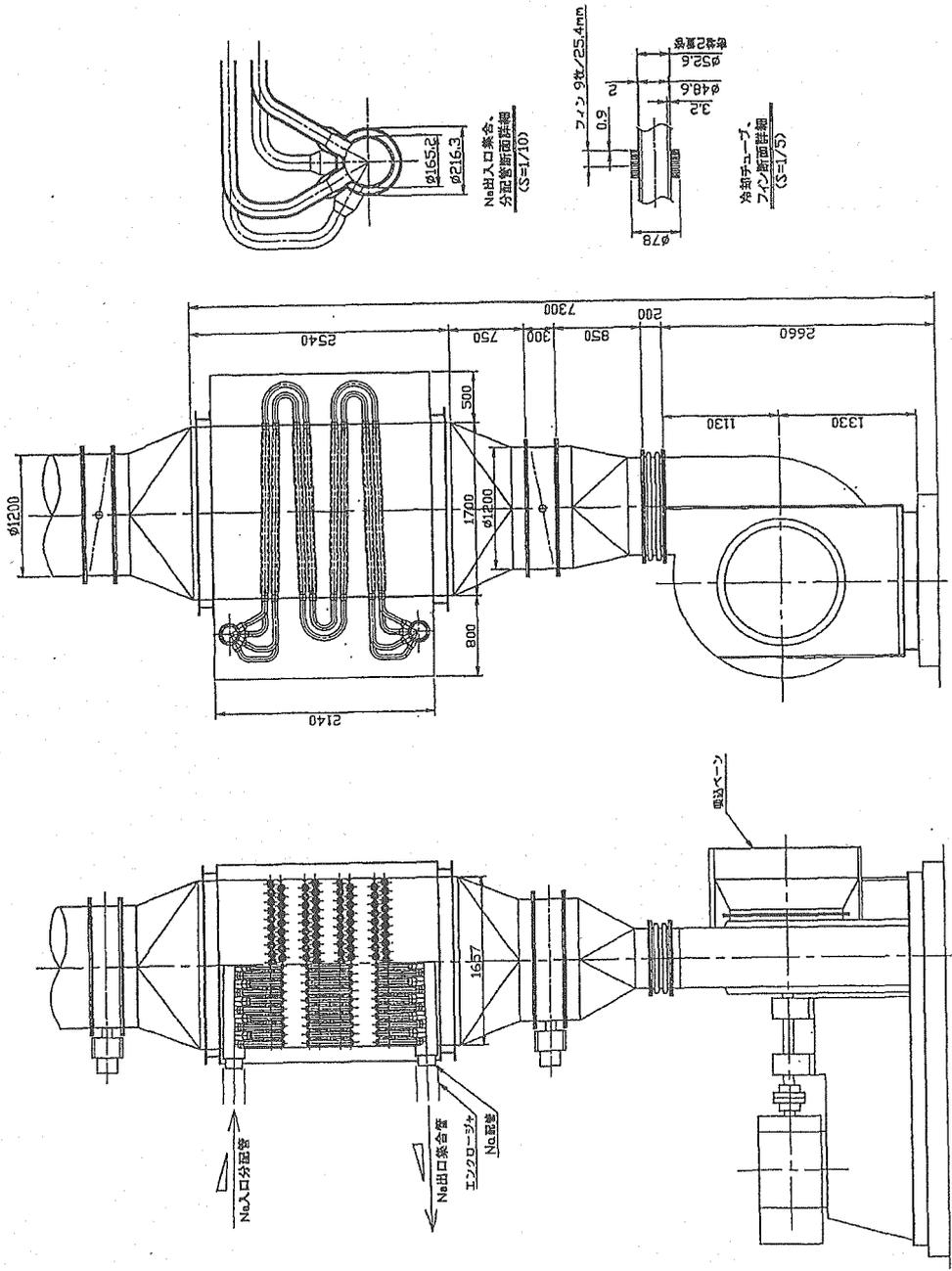


图 3.4.4-3 空氣冷却器構造概念图

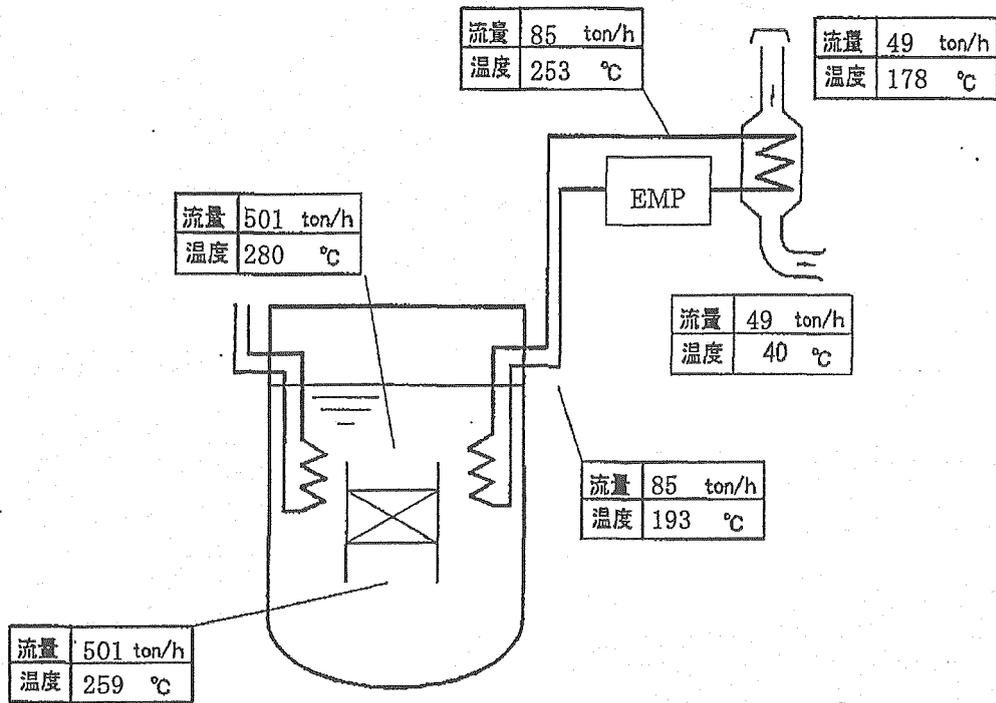


図 3.4.4-4 EVST 冷却系ヒートマスバランス図 (通常時)

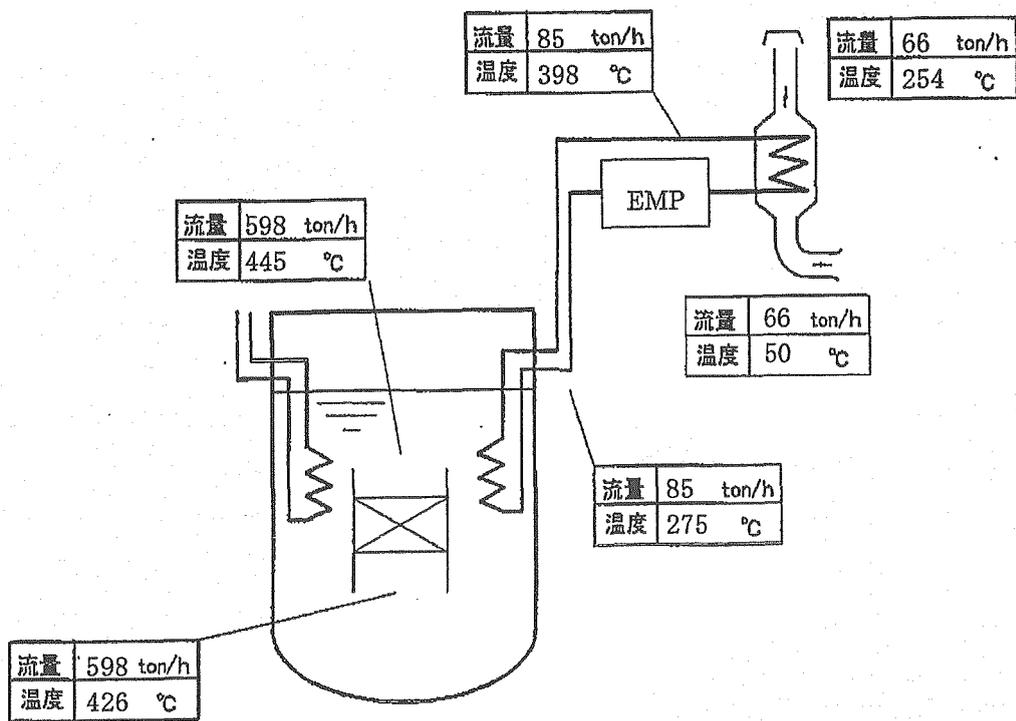
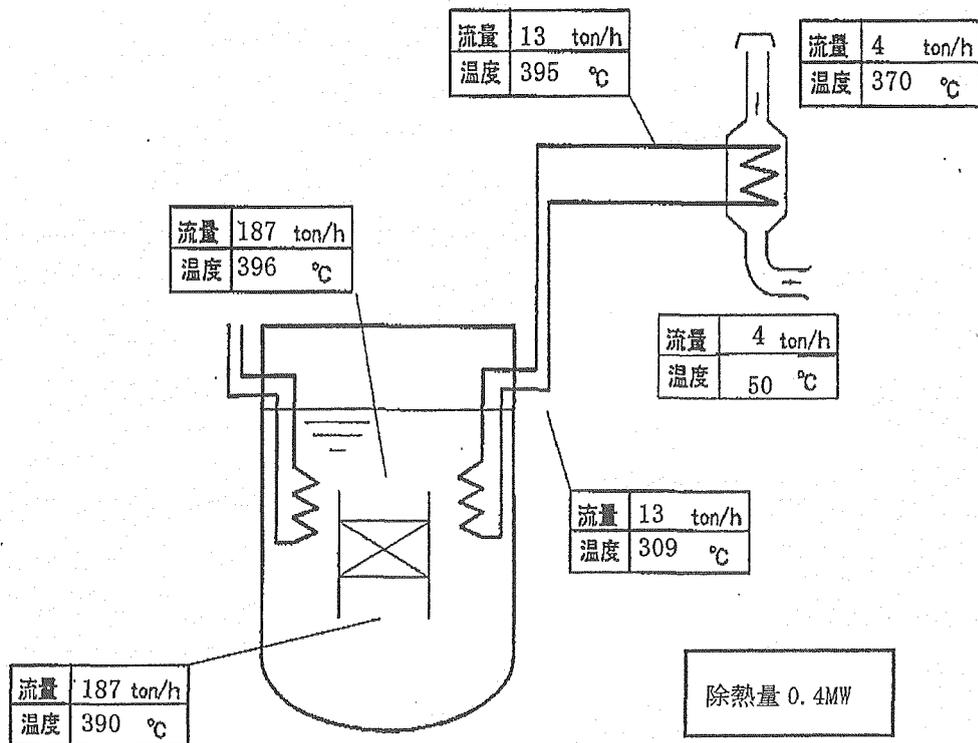


図 3.4.4-5 EVST 冷却系ヒートマスバランス図 (事故時)



自然循環ヒートマスバランス検討条件

1 冷却コイル

断面 $\phi 114.3 \times t4$ (SUS304TB)

巻径 $\phi 6600$ 、 シェラウド径 $\phi 6860 \times \phi 5860$ 、 巻数 3/ループ

2 燃料中心高さ～冷却コイル中心高さ

4m

3 配管

断面 $\phi 114.3 \times t4$ (SUS304TB)

配管長 (コイルを除く) 240m/ループ

配管高低差 (コイル～空気冷却器) 30m

4 空気冷却器

伝熱管 $\phi 48.6 \times t3.2$ (SUS304TB)、 フィン管 (密着2重管) $\phi 52.6 \times t2$ (SUS304)

フィン外径 $\phi 78 \times t0.9$ (SUS304)、 フィン枚数 7枚/25.4mm

フィン部長さ 1.8m/パス

伝熱管水平ピッチ 85mm、 配列 三角錯列 2列/パス、 パス数 4

伝熱管本数 38本

5 スタック

径×高さ $\phi 1200 \times 5m$

6 外気取入フィルタ

自然循環時は外気取入フィルタをバイパス運転とする。

図 3.4.4-6 EVST 冷却系ヒートマスバランス図 (自然循環時)

3.4.5 炉心退避検討

EVST 貯蔵容量 370 体のケースでは、3.4.1 項に記載したように、炉心退避完了までに約 1 年間所要し、最速パターンとの差異が大きい。よって、小貯蔵容量で、比較的早期に炉心退避を達成するために以下の設計対応による効果を検討した。

- ① 原子炉容器内の炉心燃料のうち、崩壊熱が低いと想定される低燃焼度の炉心燃料は使用済燃料プールに直接退避する。
- ② サイト内にナトリウムキャスクを仮設し、高崩壊熱の炉心燃料を一時的に保管する。
- ③ 燃料出入機アルゴンガス冷却系などの設計を変更して、ガス中裸状態での高発熱燃料の取扱を可能とする。

上記のうち、①について、1 サイクルしか燃焼していない炉心燃料でも、崩壊熱は約 0.8 倍（炉停止 90 日後）と大きく減衰しない。よって、燃焼期間の短い炉心燃料を使用済燃料プールに直接退避しても、炉心退避期間は約 100 日間短縮できる程度で、かつ、EVST に空きスペースがないため、ダミー燃料の仮置き場所や、予熱方法などを工夫する必要があるなど、大きな効果は期待できない。

②について、高発熱燃料用のナトリウムキャスクの開発が必要である。また、キャスク設計について事前承認を受けていても、キャスク製作期間は長いと考えられる。ただし、事前に準備しておけば、早期炉心退避を達成できる可能性を有している。

また、③について、設計・製作段階で、燃料出入機アルゴンガス冷却系の系統数や、冷却容量を増加しておく選択肢も考えられる。ガス中裸状態での高発熱燃料取扱に係る課題を解決しなければならないが、燃料取扱時間を短縮する必要性は小さく、水プール直接貯蔵方式よりも課題解決のハードルが低いと考えられる。従来の EVST 貯蔵方式からの設計変更点を表 3.4.5-1、物量およびコストへの影響を表 3.4.5-2 に示す。使用済燃料プールの除熱容量が増加するが、プール水の高温化を許容すれば^{注)} 同一の使用済燃料プール冷却浄化系仕様で対応できる可能性を有しており、燃料取扱設備全体の物量増加を 45ton 程度（コスト 1.05 倍）に抑制可能と考えられる。

以上より、EVST 貯蔵容量 370 体のケースでも、仮設キャスク（ナトリウムキャスク）の使用や、燃料出入機の冷却容量の増加などの設計工夫により、今後、詳細な検討が必要であるが、最速パターンと同程度の早期炉心退避を実現できる可能性を有していると考えられる。

注) 使用済燃料プール冷却浄化系は、プール水温が通常運転時に 52℃、1 基の熱交換器メンテナンス時に 65℃となるように設計されている。炉心退避時に、熱交換器のメンテナンスを重ね合さず、65℃の高温に到達することを許容すれば、使用済燃料プール中に早期炉心退避を実施しても、使用済燃料プール冷却浄化系仕様に影響を与えない可能性がある。

表 3.4.5-1 早期炉心退避に対応した燃料出入機仕様変更

物量への影響

対象	レファレンス	基本仕様		早期炉心対応案		備考	
		基数	物量(ton)	基数	物量(ton)		
炉内燃料移送系	燃料交換機	マニフレータ式	1基	20	1基	20	
	炉内中継装置	固定式(複数体移送対応)	4基	80	4基	80	
炉外燃料移送系	燃料出入機	レール式(収納筒1基、Na ₂ SO ₄ 外及び裸燃料、Arガス直接冷却及び空気間接冷却系2系統、複数体移送対応)	1基	195	1基	205	アルゴンガス直接冷却系の系統数及び容量増加、非常用注水系の追加
	使用済燃料関連	燃料昇降装置	1基	15	1基	30	アルゴンガス直接冷却系の系統数及び容量増加
		水中台車	1基	10	1基	20	昇降機構の追加
燃料貯蔵系	使用済燃料関連	使用済燃料プール移送機	1基	50	1基	50	
		炉外燃料貯蔵槽	1基(370体)	570	1基(370体)	580	受渡し位置での昇降機構の追加
	使用済燃料プール ⁶⁾	1基(1365体)	335	1基(1365体)	410	除熱容量が1.65MWから4.2MWに増加	
	新燃料関連	新燃料貯蔵ラック ³⁾		0		0	
燃料処理系	燃料洗浄設備	乾式燃料洗浄設備	1基	25	1基	25	
	破損燃料取扱関連	燃料検査設備	1基	30	1基	30	
その他	ナトリウム			280		280	
物量合計 ¹⁾	使用済燃料プールの除熱容量増加を考慮			1330		1450	
	使用済燃料プールの除熱容量増加を考慮せず(高温化を許容)			1330		1375	

注1)ナトリウムの物量を除く

コストへの影響

対象	レファレンス	早期炉心対応案		備考	
		基数	物量(ton)		
燃料移送系	炉内	燃料交換機、炉内中継装置	14.1	14.1	
	炉外	燃料出入機	18.3	20.2	
		上記以外の燃料移送機	4.1	6.1	
	小計	移送系小計	36.5	40.4	
燃料貯蔵系	使用済燃料関連	炉外燃料貯蔵槽 容器本体	29.1	29.6	
		炉外燃料貯蔵槽 冷却系	7.8	7.8	
		使用済燃料プール	23.3	28.5	
	小計	貯蔵系小計	60.1	65.9	
燃料処理系	燃料洗浄関連	燃料洗浄設備	0.9	0.9	
	破損燃料取扱関連	燃料検査設備	1.9	1.9	
	小計	燃料処理系小計	2.8	2.8	
電気容量	早期炉心対応による追加分		0.0	0.0	電気容量は若干増加する程度
ナトリウム	EVST関連		0.6	0.6	
燃料取扱設備 ¹⁾	使用済燃料プールの除熱容量増加を考慮		100.0	109.7	
	使用済燃料プールの除熱容量増加を考慮せず(高温化を許容)		100.0	104.5	

注1)レファレンスのコスト合計を100とする相対値

表 3.4.5-2 早期炉心退避対応による影響検討

機器	具体的内容	備考
燃料出入機	<p>・ガス中裸状態での高発熱燃料取扱に伴い、以下のように入ルゴンガス直接冷却系の仕様を変更</p> <p>① 冷却系統数の増加(「100%×2系統」から「100%×3系統」、又は、「100%×2系統×プロワ2基/系統」)</p> <p>② 除熱容量の増加(プロワ風量、熱交換器伝熱面積などの増加)</p>	<p>・取扱燃料発熱量が5kWから13.5kW(ケース2の炉停止60日後に相当)に増加</p>
燃料昇降装置	<p>非常用注水系の追設</p> <p>専用無停電電源などの容量増加</p> <p>冷却系統仕様の変更</p>	<p>・万一の燃料破損時にも、燃料溶解を防止できるように非常用注水系を設置</p> <p>・アルゴンガス直接冷却系の仕様変更に伴い、非常用ガスタービン及び無停電電源の容量増加</p> <p>・燃料出入機と同様に、ガス中裸状態での高発熱燃料取扱に伴い、アルゴンガス直接冷却系の仕様を変更</p> <p>・昇降機構の追加</p>
EVST	燃料出入機との燃料受渡し方法の工夫	<p>・EVST中でナトリウムポットを昇降する機構のため、ガスバウンダリ構成や、回転ラックとの取合など構造複雑化の恐れ有り</p>
水中台車 使用済燃料プール	<p>同上</p> <p>除熱容量の増加</p>	<p>・早期炉心退避に伴い、除熱容量が1.65MWから4.2MWに増加</p> <p>・プールの高温化(通常運転時52°C)を許容すれば設計仕様に影響のない可能性有り²⁾</p>

注1) プール水量によりプールの循環流量が決定しているため、除熱容量が増加しても、循環ポンプ、配管仕様などへの影響なし
 注2) 使用済燃料プールの冷却系は、プールの水温が通常運転時に52°C、熱交換器基のメンテナンス時に65°Cとなるように設計している。炉心退避時に、熱交換器のメンテナンスを重ね合さず、65°Cの高温に到達することを許容すれば、除熱容量が増加しても、設計仕様に影響を与えない可能性有り。

3.5 燃料洗浄設備

(1) 概要

ナトリウム冷却中型炉の燃料洗浄設備としては物量低減および放射性廃棄物低減を目的として乾式洗浄設備を選定している。ここでは乾式洗浄設備の基本構成および冷却系の検討を行った。

(2) 検討条件

検討条件を以下にまとめる。

・ 集合体発熱量	: 5kW/体
・ 集合体寸法	: 表 3.5-1
・ 予熱方式	: EVST 内予熱
・ 予熱温度	: 200～300℃ (通常運転温度)
・ 洗浄ガス	: アルゴンガス
・ 洗浄ガス温度	: 300℃ ¹⁾
・ 洗浄ガス必要流量	: 2.5Nm ³ /min ¹⁾
・ 洗浄時間	: 20 分 ¹⁾
・ ナトリウム除去率	: 50% ¹⁾

注 1) 付録 2 の乾式洗浄の検討を参考に設定。

(3) 基本構成の検討

乾式洗浄設備の基本構成の検討を行った。洗浄時は燃料出入機設備と EVST 上部床側設備を接続し洗浄系を構成する。系統構成図を図 3.5-1 に示す。洗浄時の除熱確保の観点から冷却系は 100%×2 系統とし、非常用ガスタービンおよび無停電電源に接続している。アルゴンガス循環機により昇圧したアルゴンガスは加熱器で 300℃まで昇温され、集合体の上部から供給され洗浄、冷却を行う。集合体から落下したナトリウムは EVST で回収し、その後のアルゴンガスはデミスタおよびナトリウム回収器でナトリウムを回収、冷却し、燃料出入機冷却器でさらに冷却した後にアルゴンガス循環機に送られ、ナトリウム回収器で改修したナトリウムは EVST にドレンする構成としている。

(4) 冷却系仕様の検討

乾式洗浄中の冷却系のヒートマスバランスを検討した。集合体圧力損失、無駄流れ圧力損失、熱伝達、ブローによる冷却ガスの昇温はそれぞれ表 3.5-2～5 で評価した。集合体内部の有効アルゴンガス流量を 2.5Nm³/min したときの集合体温度分布を図 3.5-2 に示す。この時の無駄流れは 5.8Nm³/min と評価され合計流量は 8.3Nm³/min である。ヒートマスバランスを図 3.5-3 に示す。設計仕様としては余裕をみて流量を 1.2 倍、圧損を 1.3 倍として設計流量 10Nm³/min、設計差圧 2600mmAq と設定した。

(5) まとめ

ナトリウム冷却中型炉の燃料洗浄設備として乾式洗浄設備を具体化した。物量低減のため EVST 床上部に燃料出入機冷却系を接続して洗浄を行う構成とした。冷却系の設計仕様としては有効流量を $2.5 \text{ Nm}^3/\text{min}$ とした場合無駄流れと不確かさを考慮して設計流量 $10 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 、設計差圧 2600 mmAq と評価された。

表 3.5-1 乾式洗浄装置検討条件

項目	設定値
1. 燃料条件	
・ 発熱量	5kW/集合体
・ 燃料寸法	
全長	4400mm
炉心高さ	1000mm
ブランケット高さ	300mm (上部) / 400mm (下部)
パッド間対面間距離	186.1mm
燃料ピン数	217 本
燃料被覆管径	10.4mm
燃料被覆管肉厚	0.71mm
燃料ピン配列ピッチ	11.51mm
スペーサワイヤ径	1.05mm
スペーサワイヤ巻付ピッチ	200mm
2. 燃料交換条件	
・ 燃料交換数	112 体/モジュール

表 3.5-2 乾式洗浄時の集合体圧力損失計算式

項目及び内容
(1)燃料ピン束の圧損
$\Delta P = \lambda \cdot (L/d) \cdot \rho \cdot V^2 / (2g)$
λ は MIT の式に基づき、下記の燃料集合体構造条件により設定
燃料ピン 217 本
ピン径 10.4mm
ピンピッチ 11.51mm
ワイヤスペーサ径 1.05mm
ワイヤスペーサ巻き付けピッチ 200mm
ラップ管内対面距離 172.1mm
層流遷移 Re 数 : 548.4
乱流遷移 Re 数 : 12819.8
層流域圧損係数 $\lambda = 93 / Re$
乱流域圧損係数 $\lambda = 0.17 / Re^{0.18}$
層流から乱流の遷移域は内挿とする。
(2)集合体の圧損
燃料集合体全体の圧損は燃料ピン束の圧損の 4/3 倍と想定する。

表 3.5-3 乾式洗浄時の無駄流れ圧力損失計算式

項目および内容	
外部流れの圧損 f の計算式	
$f = H_{\text{拡大流}} + H_{\text{管内}} + H_{\text{縮流}} \quad [\text{m}]$	
$H_{\text{縮流}}$	$= \zeta \frac{v_2^2}{2g}$
$H_{\text{管内}}$	$= \lambda \frac{l}{de} \frac{v_2^2}{2g}$
$H_{\text{拡大流}}$	$= \xi \frac{(v_2 - v_3)^2}{2g}$
ただし、	
λ : 摩擦係数	$\frac{64}{\text{Re}} \quad (\text{層流域})$
	$\frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}} \quad (\text{乱流域})$
F	: 流量
D_1	: 案内管内径 590mm
D_2	: グリッパ径 586mm
a	: 燃料集合体外対面距離 182.1mm
A_2	: グリッパ外側面積 $\frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_2^2)$
A_3	: 燃料集合体外側面積 $\frac{\pi}{4}D_1^2 - \frac{\sqrt{3}}{2}a^2$
v_2	: グリッパ外側流速 $\frac{F}{A_2}$
v_3	: 燃料集合体外側流速 $\frac{F}{A_3}$
l	: グリッパ長さ 900mm
de	: 等価直径 $D_1 - D_2$
ζ	: 損失係数 0.4
ξ	: 損失係数 1.0
Re	: レイノルズ数 $\frac{v_2 de}{\nu}$
参考資料 : 機械工学便覧, A5-74~78, 1998, 丸善	

表 3.5-4 乾式洗浄時の集合体熱伝達計算式

項目及び内容
<p>(1)燃料ピン発熱対象部と発熱分布</p> <p>発熱部：燃料部 1000mm (軸方向ブランケットは発熱無しとする。)</p> <p>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)</p> <p>(各ピンは高さ方向に同じ発熱分布)</p>
<p>(2)伝熱相関式</p> <p>$Re > 2320$</p> $Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$ <p>$Re < 2320$</p> $Nu = 4.36$
<p>(3)簡易計算方法</p> <p>簡易計算方法は以下のとおりとした。</p> <ol style="list-style-type: none"> ①冷却ガス量と燃料ピン発熱分布に基づきガス温度分布を設定 ②冷却ガス流量、温度に基づき熱伝達率を設定 ③燃料ピン発熱量、冷却ガス温度・熱伝達率に基づき被覆管温度を設定 <p>計算に際しては冷却ガス入口温度、圧力、流量に基づき順次下流側に圧力損失と温度変化を求めて、物性値の圧力・温度依存を考慮したものである。</p>

表 3.5-5 乾式洗浄時のブロワ昇温計算式

項目及び内容
<p>①ブロワ昇圧に伴う温度上昇の算出方法</p> $\Delta T = T_{in} \cdot ((P_{in}/P_{out})^{(\kappa-1)/\kappa} - 1) / \eta$ <p>ΔT : ブロワの空気出入口温度差 (K)</p> <p>T_{in} : 入口温度 (K)</p> <p>P_{in} : 吸込み圧力 (Pa)</p> <p>P_{out} : 吐出圧力 (Pa)</p> <p>κ : 比熱比 (空気 : 1.4、アルゴン : 1.669)</p> <p>η : 断熱効率 (65%)</p> <p>なお、P_{out} は以下の条件とする (2割の余裕を考慮)</p> $P_{out} - P_{in} = 1.2 \cdot \Delta P$ <p>ΔP : 圧損計算により求めた値</p>
<p>②ブロワ必要軸動力</p> $A = (\kappa / (\kappa - 1)) \cdot (Q/6120) \cdot ((P_{in}/P_{out})^{(\kappa-1)/\kappa} - 1) / \eta$ <p>Q : 吸込み流量 (m³/min)</p> <p>P_{in}、P_{out}、κ、η は上記①と同様</p>

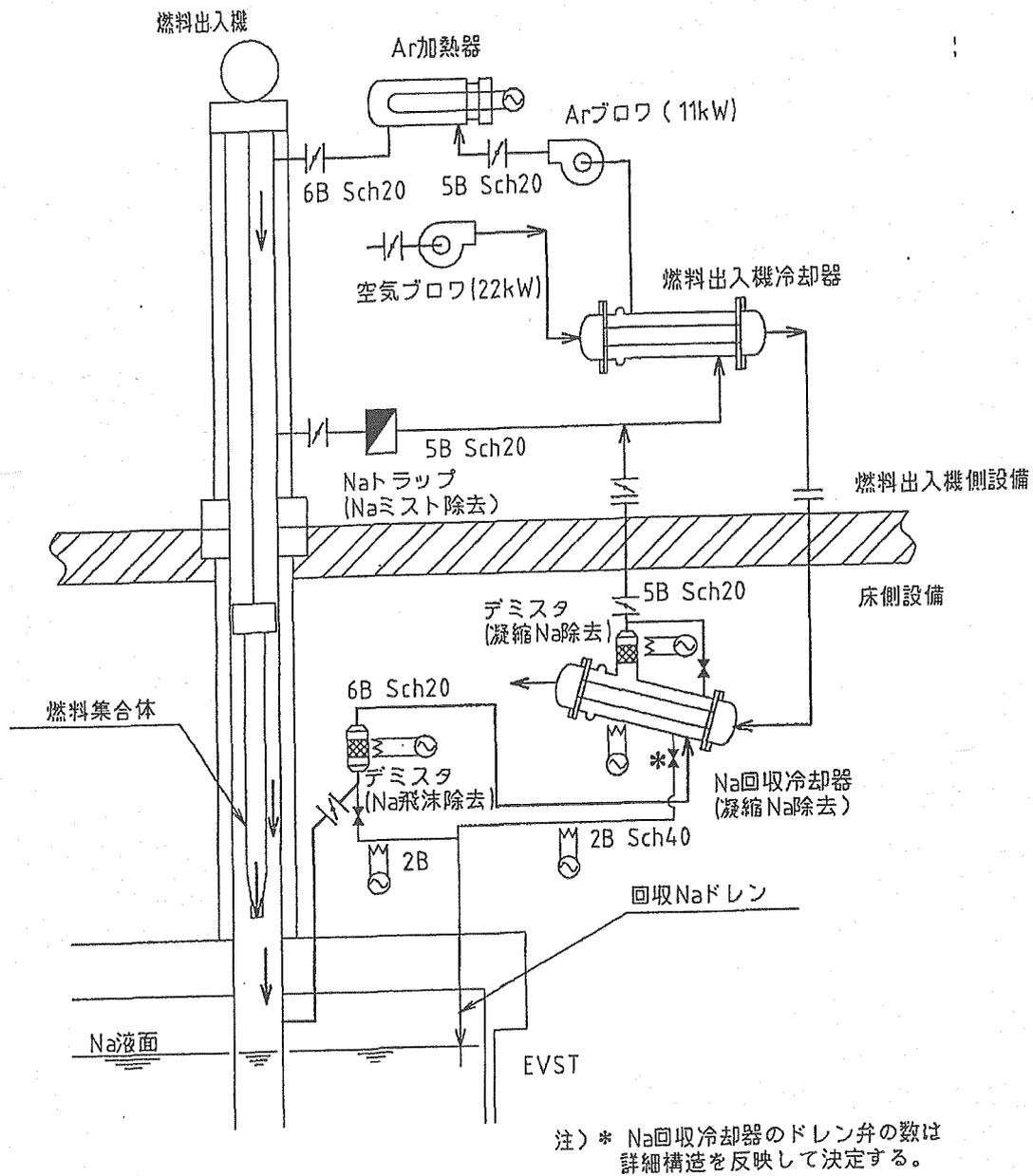


図 3.5-1 乾式洗浄時の系統構成図

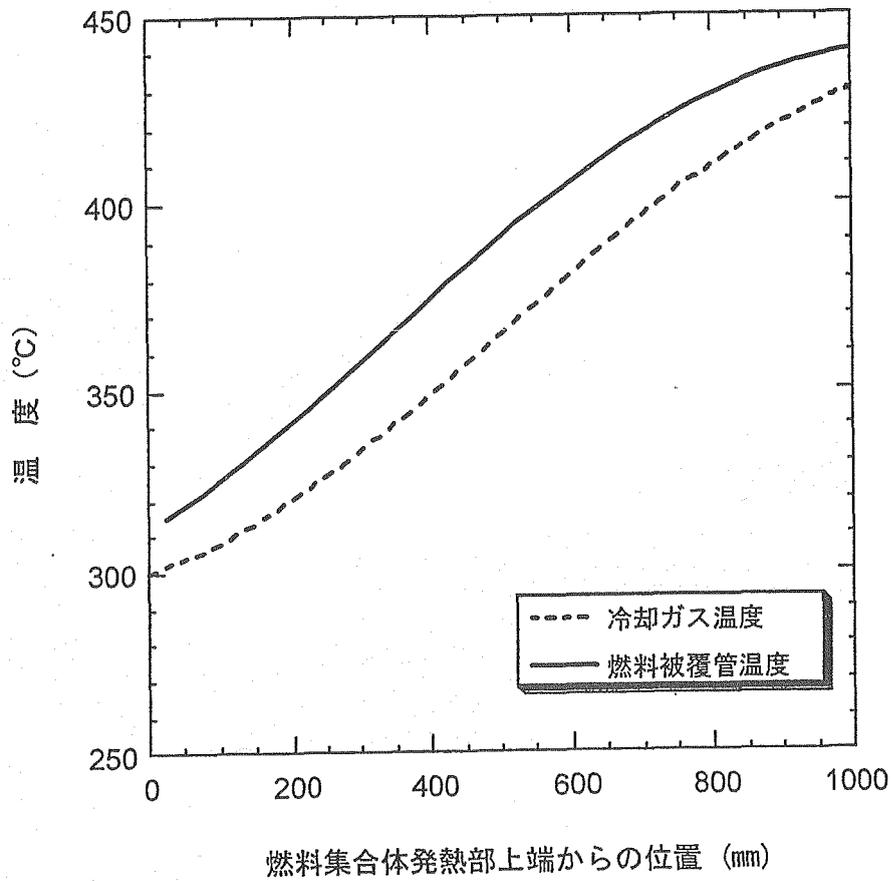


図 3.5-2 乾式洗浄時の集合体温度分布

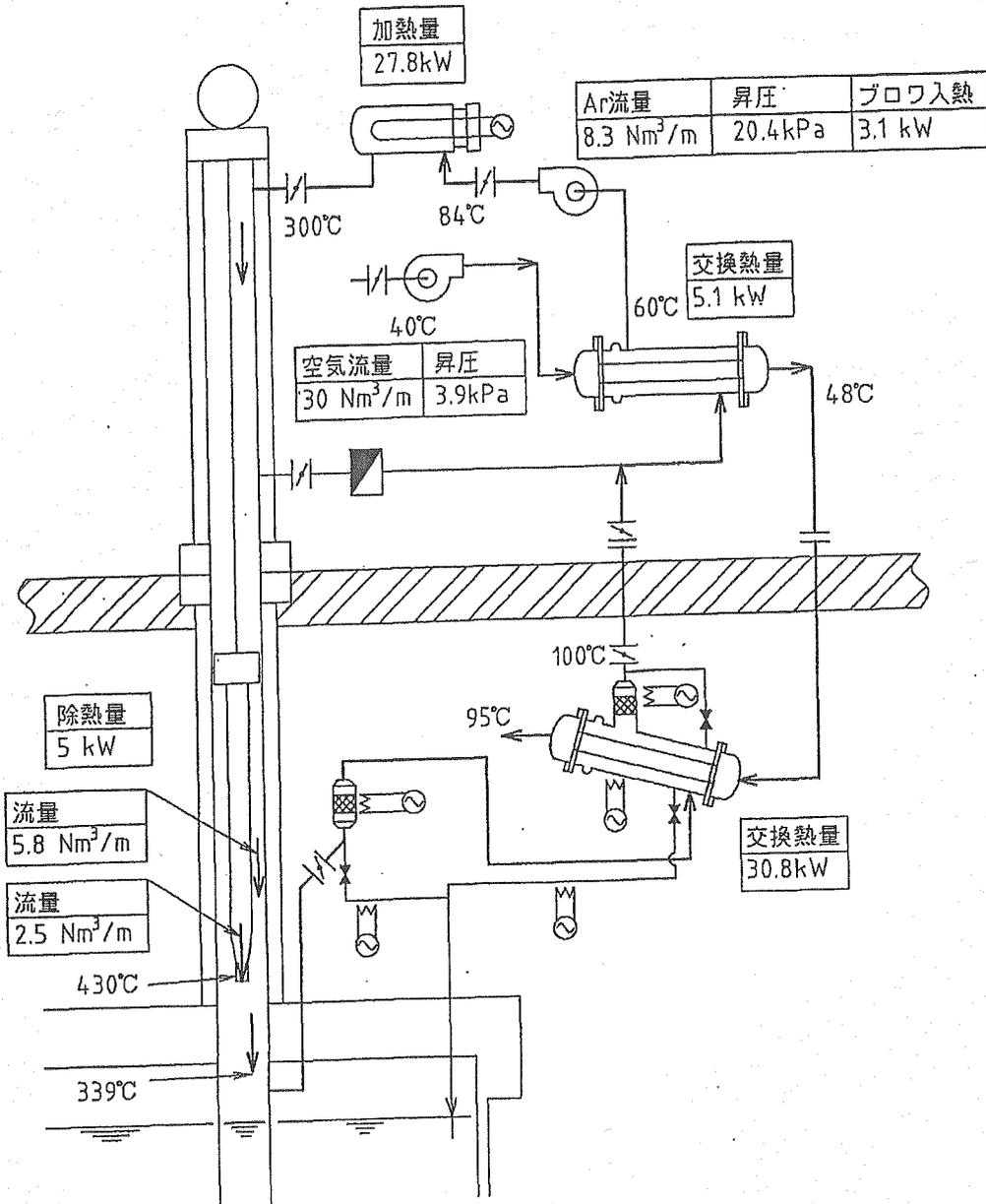


図 3.5-3 乾式洗浄時のヒートマスバランス図

3.6 燃料昇降装置

(1) 概要

燃料昇降装置はナトリウム洗浄後の使用済燃料を燃料出入機から受け取り使用済燃料プールに水中装荷する設備である。ここでは燃料昇降装置の具体化および代替概念である燃料昇降機能を有する水中台車の検討を行った。

(2) 検討条件

検討対象はナトリウム冷却中型 4 モジュールプラントとする。検討条件を以下にまとめた。

- ・ 集合体発熱量 : 5kW/体
- ・ 残留ナトリウム : 50%
- ・ 冷却ガス : アルゴンガス
- ・ 冷却ガス温度 : 150℃
- ・ 水浸漬速度 : 0.6m/min¹⁾
- ・ 水浸漬時被覆管最高温度 : 350℃以下 (文献[9])

また、燃料昇降装置の要求機能を以下に示す。

- ・ 燃料受入機能 : 燃料出入機から仮受け台に燃料を受け入れる機能
- ・ 冷却機能 : 受入れた燃料の除熱を確保する機能
- ・ 水浸漬機能 : 燃料を水浸漬し水中台車に受け渡す機能
- ・ 雰囲気分離機能 : 水浸漬時の湿分を燃料出入機から分離する機能

注1) 付録2の乾式洗浄の検討を参考に設定。

(2) 概念検討

燃料昇降装置の概念図を図3.6-1に、冷却系系統図を図3.6-2に示す。燃料出入機から仮受け台までの移送は燃料出入機グリッパにより行う。この間の冷却は燃料出入機と燃料昇降設備を接続し床循環直接冷却系を構成し、燃料出入機グリッパからのアルゴンガスにより冷却する。仮受け台設置後は燃料出入機グリッパを切り離し、燃料昇降装置グリッパを横方向からスイングさせて集合体頂部に接続し燃料昇降装置冷却系を構成する。その後、燃料出入機はグリッパ収納後、床ドアバルブを閉じ分離する。

燃料出入機グリッパと燃料昇降装置グリッパとの切り替え中にグリッパが停止した場合は冷却系流路が形成されない可能性があるため、燃料集合体は案内管中に設置して、集合体外部の冷却材流路を制限することにより集合体内部の冷却ガス流量を確保している。

燃料昇降装置冷却系では水浸漬中に燃料温度を水浸漬温度 350℃以下が確保できるように冷却する。燃料のエントランスノズルが水浸漬した後は冷却系パスが喪失する。このため燃料の水浸漬中は冷却に期待しないで被覆管最高温度を 350℃以下に保つ必要がある。燃料の断熱温度上昇を仮定すると水浸漬時の温度上昇は集合体の断熱温度上昇率を 7℃/min

(文献[5]から外挿) とすると以下の式より 35℃と評価される。このため、仮受け台における集合体の冷却条件としては、被覆管最高温度を 300℃として設定する。

$$\frac{\text{エントランスノズルから炉心上部}}{\text{水浸漬速度}} \times \text{温度上昇率} = \frac{2.89m}{0.6m/min} \times 7^\circ\text{C}/\text{min} = 35^\circ\text{C}$$

仮受け台において冷却後、仮受け台を取り除き燃料昇降装置と使用済燃料プール間のドアバルブを開け、速度 0.6m/min において水浸漬を行い水中台車への受け渡しを行う。

燃料受け渡し後、燃料昇降装置グリッパを収納して燃料昇降装置と使用済燃料プール間のドアバルブを閉じ、燃料昇降装置グリッパ、仮受け台、案内管等の乾燥を行い水分を除去することで燃料出入機への水分移行を防止する。

(4) 代替概念検討

代替概念として燃料昇降機能を有する水中台車の検討を行った。構造概念図を図 3.6-3、本概念を用いた使用済燃料プールの燃料受け入れ手順を図 3.6-4 に示す。手順の概略を以下で説明する。

- ・ 使用済燃料プールの燃料受け入れ位置に水中台車を移動し案内管、冷却ガス配管、排水管を接続
- ・ 水中台車案内管内部の水を排水
- ・ 水中台車案内管上部のドアバルブを開放、水中台車昇降機構を上昇し燃料仮受け位置に設置・乾燥
- ・ 床ドアバルブ開放し、燃料出入機グリッパにより使用済燃料を仮受け位置まで移送・冷却
- ・ 水中台車昇降機構を下降し水中台車案内管部に使用済燃料を収納、水中台車案内管上部のドアバルブを閉止
- ・ 水中台車案内管に水注入（集合体の水浸漬速度は 0.6m/min 以下）し使用済燃料の水浸漬・受け入れ完了

本概念は水中台車に燃料昇降機能を持たせているため燃料昇降装置本体を大幅に合理化する可能性を有している。ただし、水中台車案内管からの排水方法および冷却ガス配管の接続方法等課題を有するため代替概念とする。

(5) 課題

本年度検討を実施した燃料昇降装置の課題を以下にまとめた。

- ・ 燃料洗浄方式として乾式洗浄を選択しているため使用済燃料集合体に約 50%のナトリウムが付着している可能性がある。この時ナトリウムの付着条件を保守的に評価した場合は燃料被覆管破損に対して余裕が少ない（付録 1 乾式洗浄の検討参照）。こ

のため使用済燃料集合体を水浸漬する前にナトリウムを不活性化する必要があると考えられる。

- 燃料昇降装置グリッパは燃料出入機グリッパと使用済燃料集合体の受け渡しを行う必要があるため、お互いに回避可能な構造とする必要がある。また、燃料昇降機能および冷却機能を有するため詳細な構造を検討する必要がある。
- 燃料昇降装置の重要な機能として燃料出入機（ナトリウム雰囲気）と使用済燃料プール（水雰囲気）の雰囲気分離がある。現状は燃料昇降装置の案内管、グリッパ、仮受け台等を乾燥することにより雰囲気分離を想定しているが乾燥方法および乾燥時間を今後検討する必要がある。

(6) まとめ

ナトリウム洗浄後の使用済燃料を燃料出入機から受け取り使用済燃料プールに水中装荷する設備として燃料昇降装置の具体化および代替概念である燃料昇降機能を有する水中台車の検討を行った。課題としてナトリウム不活性化方法、燃料昇降装置グリッパ構造、雰囲気分離方法が整理された。

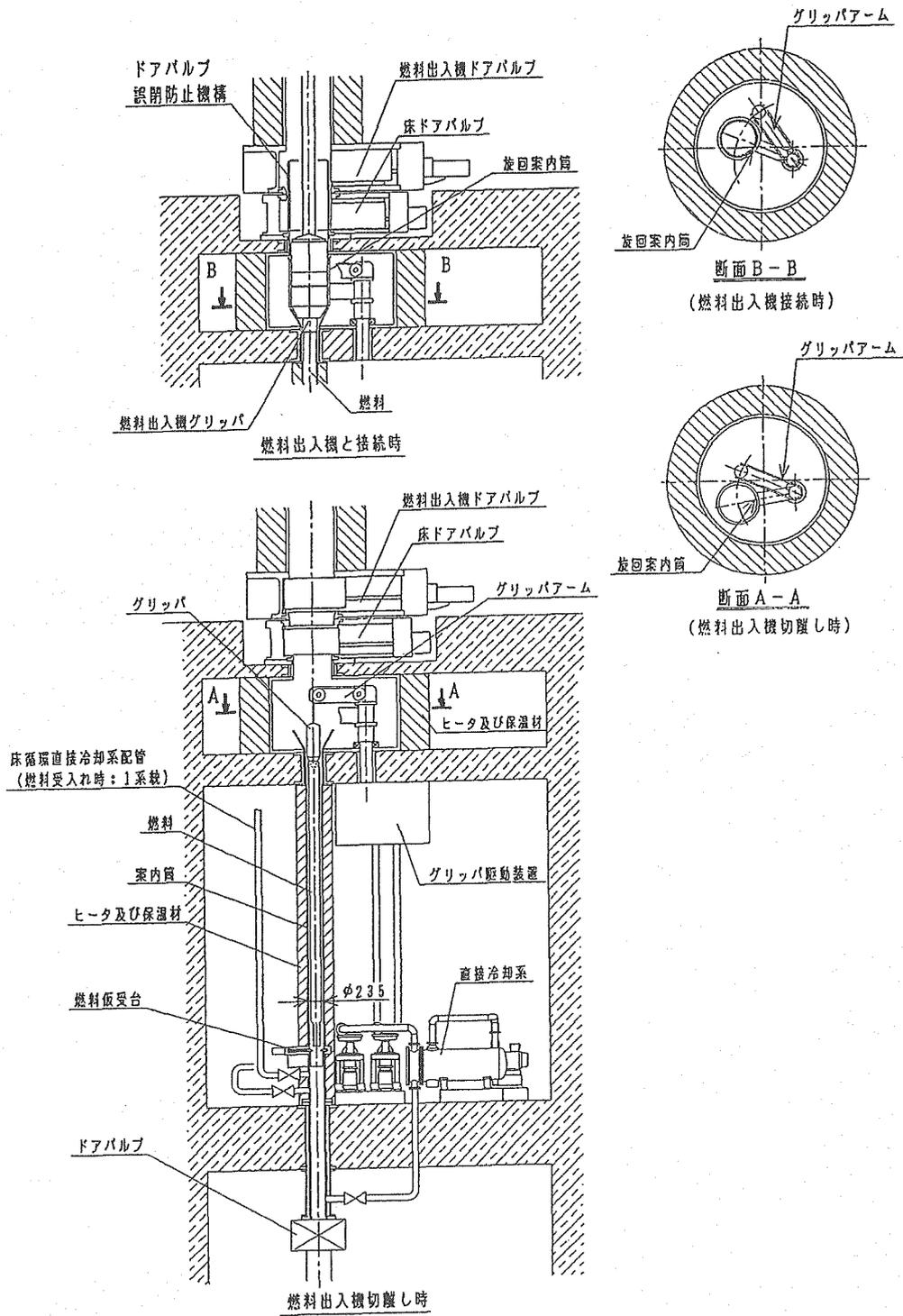


図 3.6-1 燃料昇降装置概念図

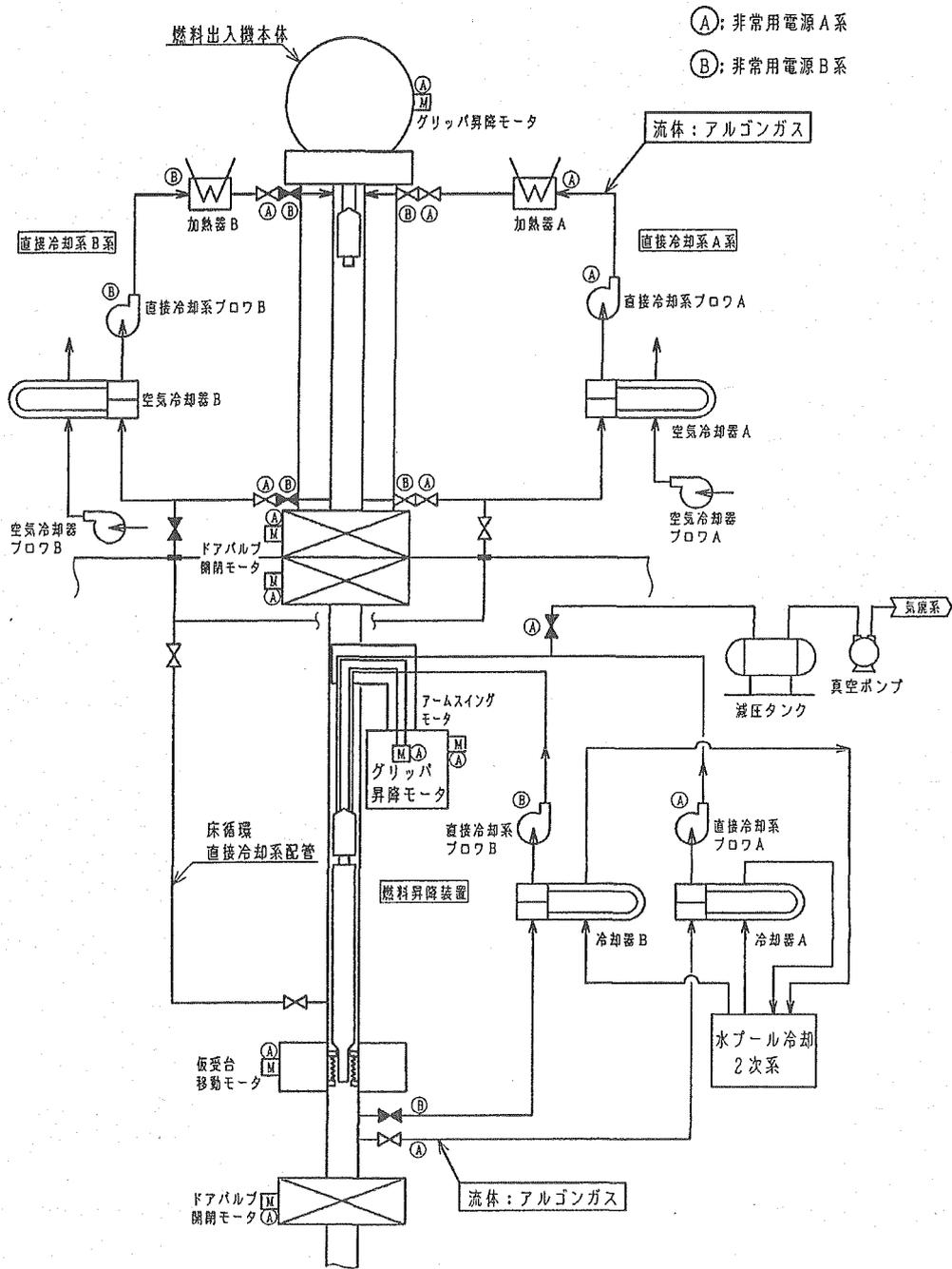


図 3.6-2 燃料昇降装置冷却系概念図

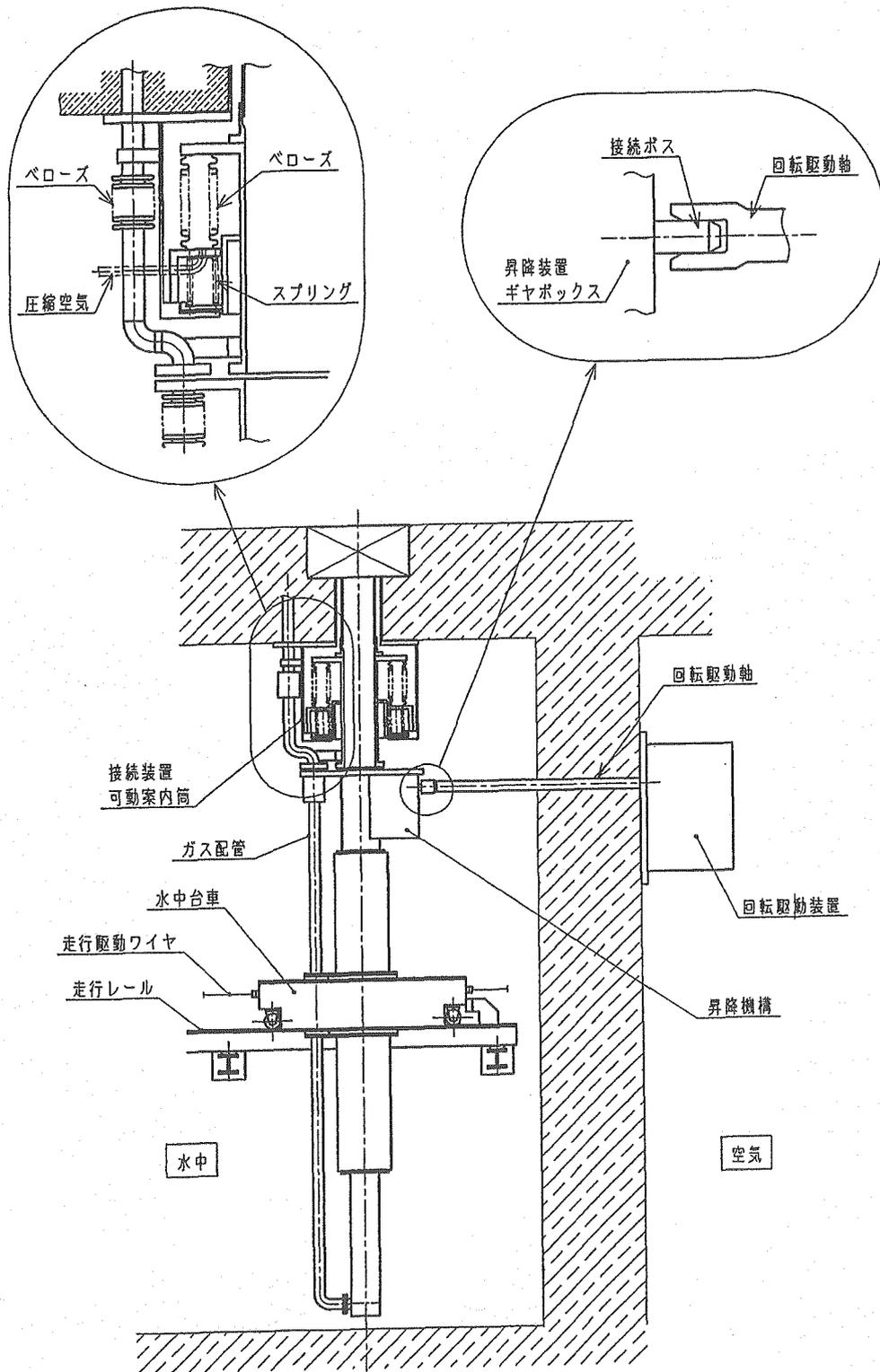
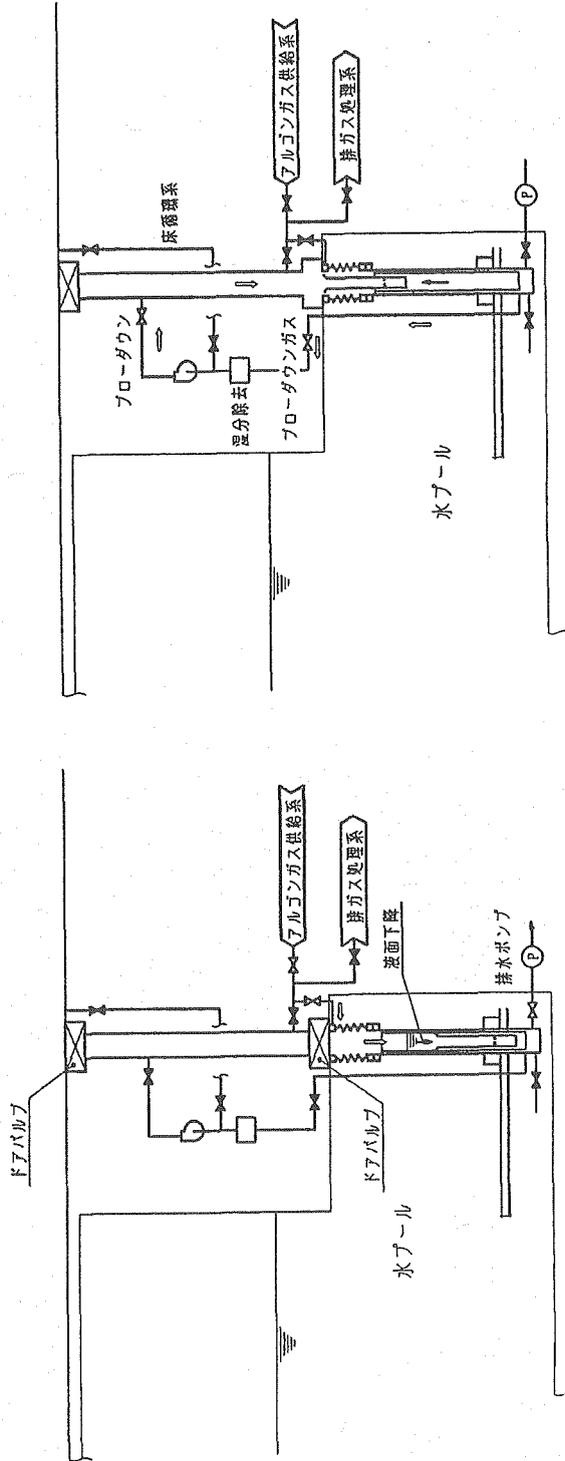


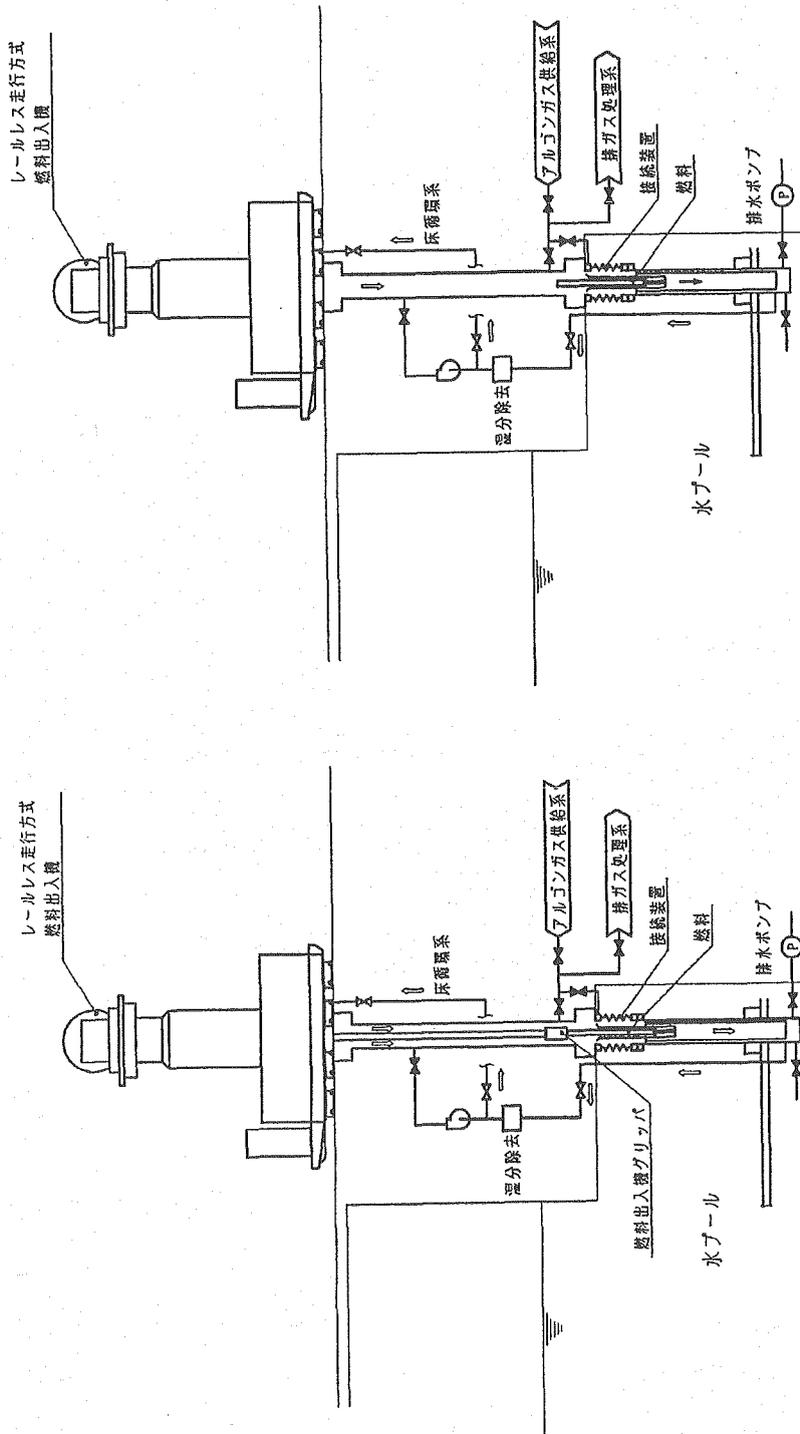
図 3.6-3 燃料昇降機能を有する水中台車概念図



- ① 水中台車接続
- ② アルゴンガス供給しつつ、内部水排水

- ③ 接続装置ドアバルブ「開」、プロードダウン

図 3.6-4 (1/3) 燃料昇降機能を有する水中台車作業手順

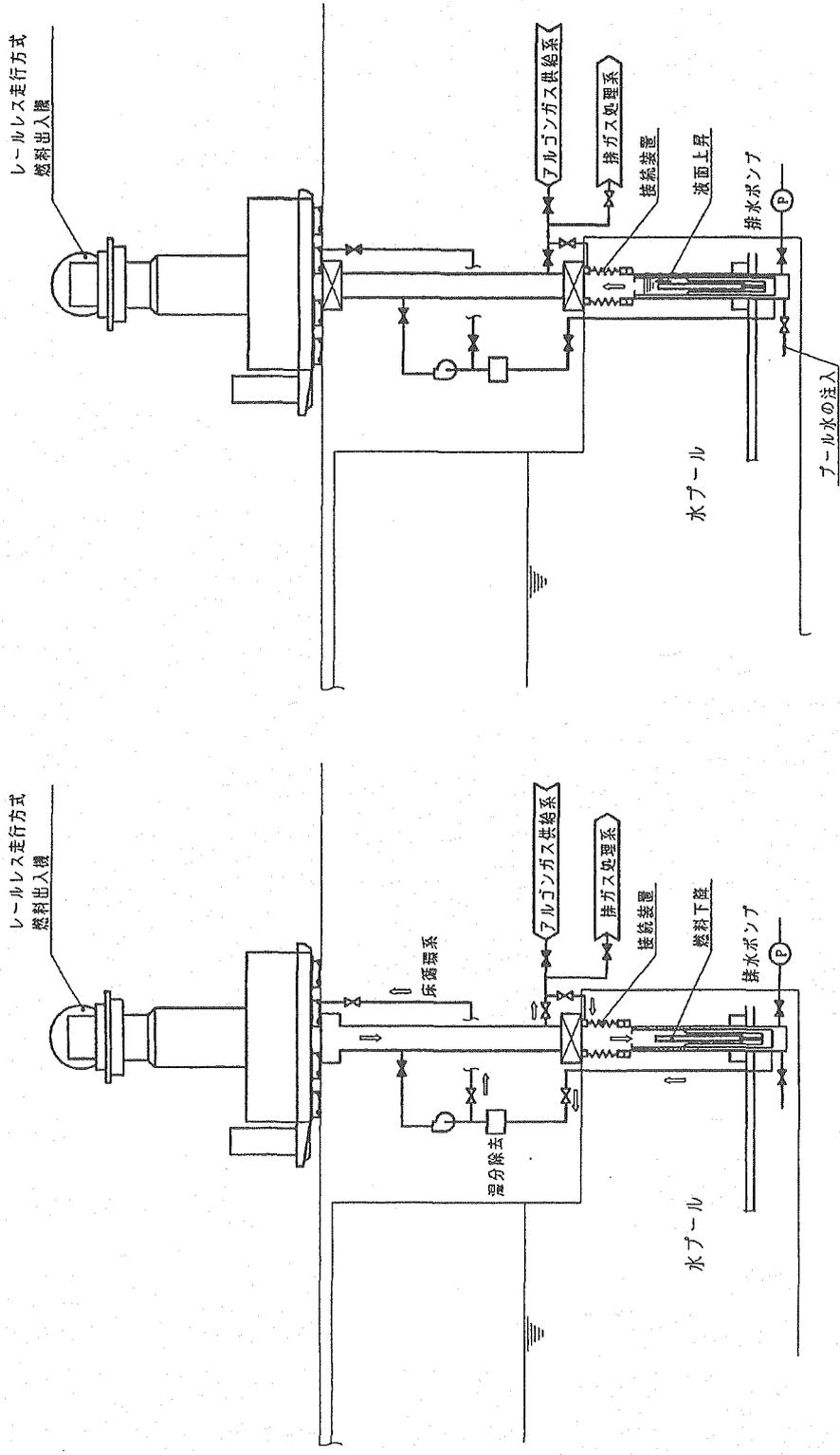


⑥ グリッパ上昇、昇降機構下降

④ 燃料出入機接続、床循環系に切換

⑤ 燃料出入機グリッパで水中台車まで吊り上げ

図 3.6-4 (2/3) 燃料昇降機能を有する水中台車作業手順



⑦ 接続装置ドアバルブ「閉」、バイパスして冷却維持

⑧ 排ガス処理系から排気しつつプール水注入

図 3.6-4 (3/3) 燃料昇降機能を有する水中台車作業手順

3.7 使用済燃料プール

3.7.1 貯蔵容量検討

(1) 概要

使用済燃料プールは EVST において崩壊熱を減衰させた使用済燃料を、再処理設備に搬出可能な発熱量に減衰するまで水中貯蔵する設備である。ここではナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントを対象として使用済燃料プールの貯蔵容量を検討した。

(2) 検討条件

検討対象はナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントを対象とした。検討条件を以下にまとめる。

- ・ 検討対象 : ナトリウム冷却炉 4 モジュールプラント
- ・ 集合体数 : 333 体/炉心
: 84 体/バッチ
- ・ バッチ数 : 4 バッチ
- ・ 制御棒体数 : 28 体/炉心
- ・ 運転サイクル : 26 ヶ月
- ・ 再処理搬出待ち貯蔵期間 : 4 年
- ・ 再処理故障対応期間 : 4 年
- ・ 炉心退避対応貯蔵容量 : 1 炉心分
- ・ 破損燃料 : 6 体
- ・ EVST 貯蔵期間 : 4kW/体 (炉停止後 21 ヶ月) または
5kW (炉停止後 15 ヶ月)

(3) 全体貯蔵容量

再処理搬出待ち、再処理故障対応、炉心退避対応全ての貯蔵容量を考慮して、プラント全体の貯蔵容量を検討した。再処理搬出待ち貯蔵容量はナトリウム冷却中型炉の運転サイクルが 26 ヶ月であることを考慮すると、4 年間の搬出待ちの間 2 回、各 84 体/バッチの燃料集合体の交換作業が行われその貯蔵容量を確保することを考えると以下で評価される。

$$\text{再処理搬出待ち貯蔵容量} = \frac{4\text{年} \times 12\text{ヶ月/年}}{26\text{ヶ月}} \times 84\text{体/バッチ} \times 4\text{モジュール} = 672\text{体}$$

ただし、実際の 1 炉心の燃料集合体は 84 体/バッチ × 4 バッチ = 336 体より少ない 333 体のため、必要な貯蔵容量は 2 炉心分である 666 体である。再処理故障対応についても 4 年間の対応を検討条件としているため、同様な考え方で 2 炉心分の貯蔵容量を想定し 666 体を確保する。その他、炉心退避対応および破損燃料対応を考慮すると、全体貯蔵容量は以下

の式に示すように 1671 体と評価される。

$$\begin{aligned} \text{全体貯蔵容量} &= \text{再処理搬出待ち} + \text{再処理故障対応} + \text{炉心退避対応} + \text{破損燃料} \\ &= 666 + 666 + 333 + 6 = 1671 \text{体} \end{aligned}$$

(4) 使用済燃料プール貯蔵容量

使用済燃料プールは EVST で減衰された燃料を貯蔵する。ここでは 3.4.1 項で検討された EVST 貯蔵容量を基に、使用済燃料プールの貯蔵容量を検討した。EVST では使用済燃料集合体の発熱量が 4~5kW/体になるまでの貯蔵を行うことを計画している。このとき必要な貯蔵期間は 21~15 ヶ月であり運転サイクル長である 26 ヶ月より短い。このため EVST 貯蔵容量は以下のように使用済燃料貯蔵分としては 336 体が確保されている（実際の EVST 貯蔵容量はこの他に制御棒 1 モジュール分の貯蔵容量を考慮して 28 体を加え、EVST 全体で 370 体の貯蔵容量を確保している）。

$$\text{EVST貯蔵容量} = 84 \text{体} \times 4 \text{モジュール} + \text{破損燃料} 6 \text{体} = 342 \text{体}$$

使用済燃料プールの貯蔵容量としては全体貯蔵容量から EVST 貯蔵容量を除いて以下のように 1329 体と評価される。

$$\text{使用済燃料プール貯蔵容量} = 1671 - 342 = 1329 \text{体}$$

(5) まとめ

ナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントの使用済燃料の全体貯蔵容量および使用済燃料プールの貯蔵容量を検討した。全体貯蔵容量は再処理搬出待ち、再処理故障対応、炉心退避を考慮して 1671 体、使用済燃料プール貯蔵容量は全体貯蔵容量から EVST 貯蔵容量を差し引いて 1329 体と評価された。

3.7.2 臨界ピッチ評価

(1) 概要

ナトリウム冷却中型炉の炉心において高内部転換型炉心が採用され、集合体形状および燃料インベントリが大幅に変更したこと考慮して、ナトリウム冷却中型炉における使用済燃料プールの臨界ピッチの評価を行った。

(3) 検討条件

解析コードとしてモンテカルロ法を用いた解析コード MCNP を用いた。従来評価では軸方向、水平方向とも無限に燃料が配列されていることを仮定するのが標準となっているが、ここでは解析評価手法の精度が向上していることを考慮して、水平方向は無限体系としたが軸方向は有限体系として水反射体を設置して評価した。解析条件を表 3.7.2-1、計算体系を図 3.7.2-1 に示す。主要な検討条件を以下に示す。

- ・ 解析コード : MCNP (文献[8])
- ・ 評価方法 : モンテカルロ法
- ・ 核データライブラリ : JENDL-3.3
- ・ 燃料組成 : 保守的な条件として外側炉心新燃料を使用
- ・ 収納管 : 燃料部のみ設置
肉厚 5mm
材質 SUS304
- ・ 冷却材 : 水
温度 300K
密度 0.979g/cm³ (65°C相当)
- ・ 配列 : 三角配列
- ・ 水平方向境界条件 : 無限配列
- ・ 垂直方向境界条件 : 水反射体 30cm
- ・ 評価基準 : 中性子増倍率 0.95 以下

(2) 検討結果

配列ピッチと中性子増倍率の関係を図 3.7.2-2 に示す。評価基準である中性子増倍率 0.95 を満たす配列ピッチは 230mm と評価された。

参考までに従来評価で用いられている標準的な条件として、軸方向にも一様に燃料が配列されていることを仮定した場合の評価結果を図中に三角のプロットで示す。この場合の中性子増倍率は燃料高さを有限として水反射体を上下に設置したレファレンスケースに対し 0.03 程度中性子増倍率が増加する。

設計で用いる使用済燃料貯蔵プールの配列ピッチは臨界ピッチに、製造公差、据付公差、その他不確かさを考慮することで以下のように 258mm と設定した。

収納管内総偏り	: 20mm
寸法誤差	: 6mm
ラック変形等	: 2mm
臨界ピッチ	: 230mm
設計配列ピッチ	: 258mm

(4) まとめ

ナトリウム冷却中型炉における使用済燃料プールの臨界ピッチをモンテカルロ法を用いた解析により評価した。臨界ピッチは 230mm、製造公差、据付公差、その他不確かさを考慮した設計配列ピッチは 258mm と評価された。

表 3.7.2-1 使用済燃料プール臨界ピッチ計算条件

	項目	単位	値	備考
燃料組成	理論密度	g/cm ³	11.0	
	スミア密度	%	82	
	プルトニウム同位体組成比	%	Pu238 = 1.1 Pu239 = 54.1 Pu240 = 32.1 Pu241 = 4.3 Pu242 = 3.9 Np237 = 0.5 Am241 = 2.0 Am243 = 1.0 Cm244 = 1.0 Cm245 = 0.0	解析では、Pu-238、Np-237、Am-241, 243、Cm-244, 245 は無視した。
	FP 混入率	Vol. %	2.0	
	プルトニウム富化度	wt%	(内側炉心) 19.3 (外側炉心) 23.0	
軸ブランケット	ウラン濃縮度	%	0.3	
	理論密度	g/cm ³	10.96	
	スミア密度	%	91	
被覆管	ウラン濃縮度	%		
	密度	g/cm ³	7.87	20℃
ラップ管	組成	wt%	Mn = 0.6 Ni = 0.4 Cr = 11.0 Mo = 0.5 W = 2.0 Fe = 85.5	ODS 鋼
	密度	g/cm ³	7.87	20℃
ラップ管	組成	wt%	Mn = 0.6 Ni = 0.4 Cr = 11.0 Mo = 0.5 W = 2.0 Fe = 85.5	PNC-FMS 鋼
	被覆管内外径	mm	(内径) φ 8.98 (外形) φ 10.4	
幾何形状	ラップ管対面間距離	mm	(内面) 172.1 (外面) 182.1	
	スペーサワイヤ直径	mm	1.05	解析では無視した。
	炉心高さ	mm	1000	
	軸ブランケット高さ	mm	(上部) 300 (下部) 300	
	燃料ピン配列ピッチ	mm	11.51	
	燃料ピン数	ピン/SA	217 本	

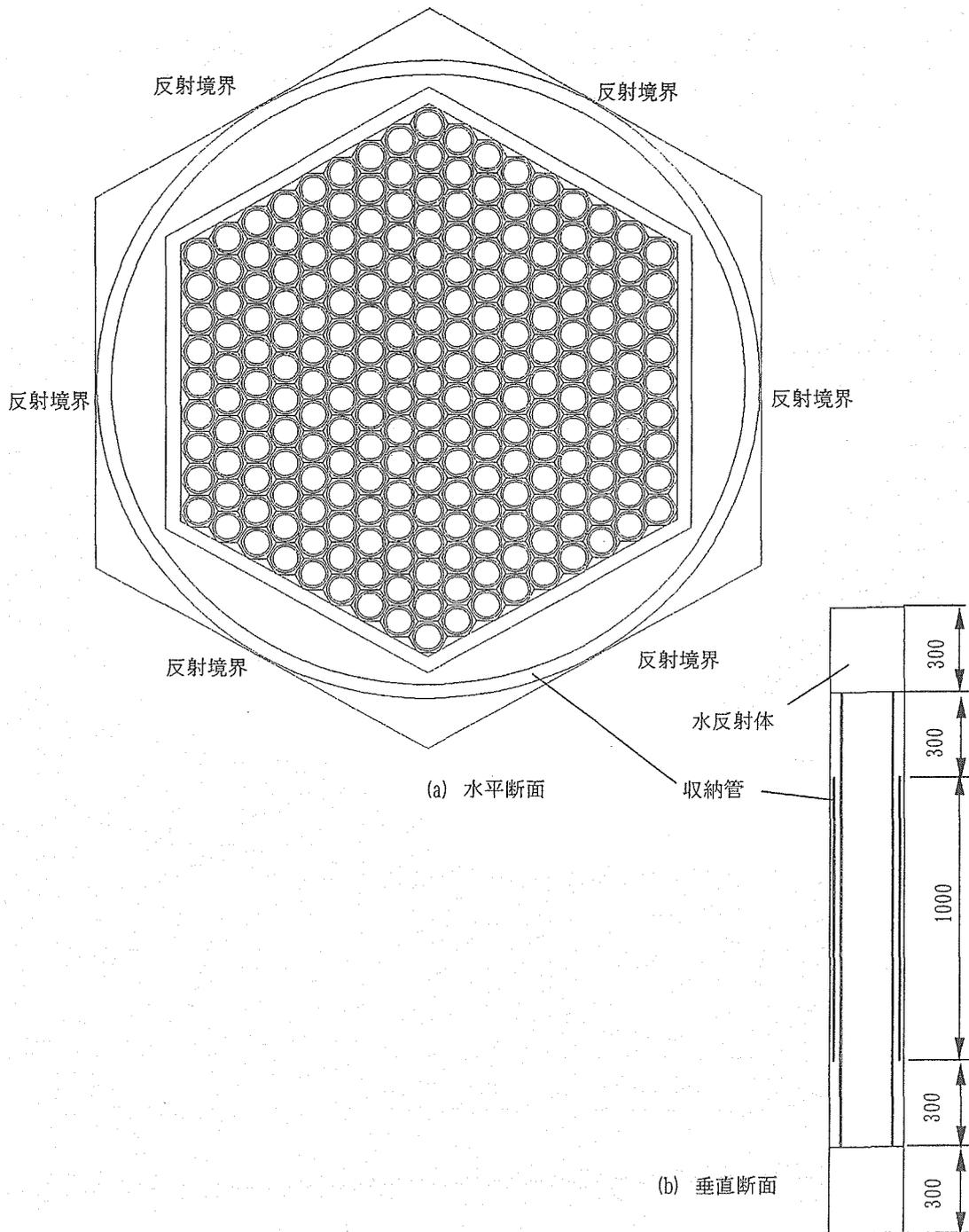
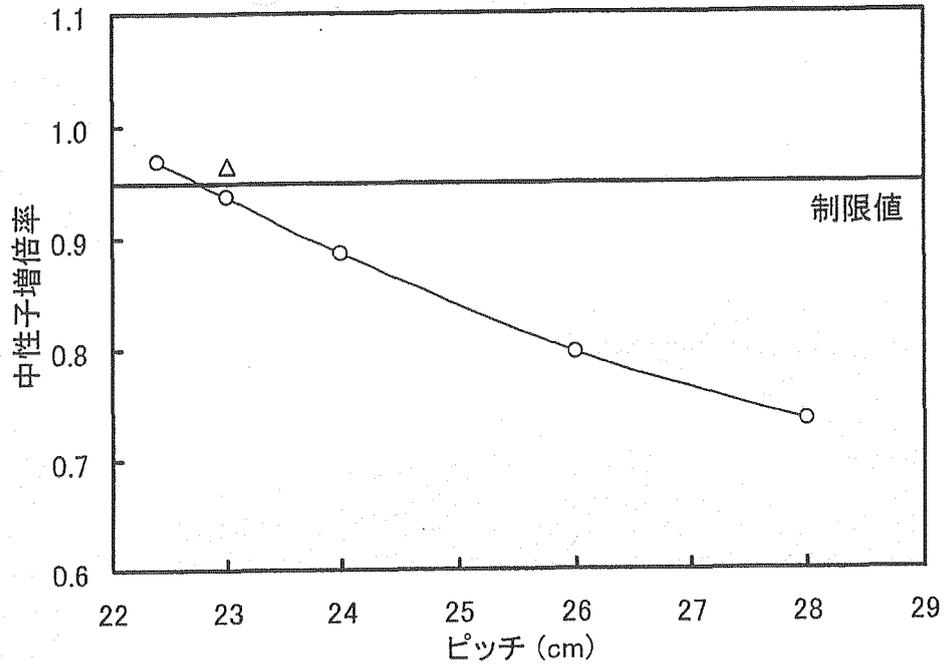


図 3.7.2-1 臨界計算体系（使用済燃料プール）



No.	ピッチ* (cm)	中性子増倍率 k _{eff}	標準偏差 σ	評価値 k _{eff} +3σ	備考
1	22.4	0.96557	0.00073	0.9678	
2	23.0	0.93413	0.00065	0.9361	
3	24.0	0.88447	0.00063	0.8864	
4	26.0	0.79495	0.00067	0.7970	
5	28.0	0.73256	0.00069	0.7346	
6	23.0	0.96334	0.00061	0.9652	軸方向無限大

図 3.7.2-2 臨界計算結果 (使用済燃料プール)

3.7.3 構造概念検討

(1) 概要

ナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントにおける使用済燃料プールの構造概念を検討した。貯蔵容量および配列ピッチ寸法については 3.7.1 項および 3.7.2 項の検討結果を用いた。

(2) 検討条件

検討対象はナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントを対象とした。検討条件を以下にまとめる。貯蔵容量として 3.7.1 項の必要貯蔵容量を暫定値として使用したが、貯蔵ラックを具体化することにより最終的な設計貯蔵容量を設定した。

・ 検討対象	: ナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラント
・ 炉心集合体数	: 333 体/炉心
・ 1 バッチ集合体数	: 84 体/バッチ
・ バッチ数	: 4 バッチ
・ 運転サイクル期間	: 26 ヶ月
・ 減衰待ち貯蔵期間	: 15 ヶ月 (5kW/体)、21 ヶ月 (4kW/体)
・ プラント貯蔵容量	: 1671 体 (3.7.1 項参照)
・ EVST 貯蔵容量	: 370 体 (3.4.1 項参照)
・ 使用済燃料プール貯蔵容量	: 1329 体 (3.7.1 項参照、必要貯蔵容量)
・ ラッパ管外対面間距離	: 182.1mm
・ ラッパ管外対角寸法	: 210.3mm
・ パッド間対面間距離	: 186.1mm
・ 集合体高さ	: 4400mm
・ 配列方法	: 三角配列
・ 配列ピッチ	: 258mm (3.7.2 項参照)

(3) 検討結果

貯蔵ラックの概念図を図 3.7.2-1 に示す。配列ピッチ 258mm において三角配列とすると 3180mm×2700mm のラックに 105 体の集合体を貯蔵可能である。使用済燃料プール内に配置する貯蔵ラックは数は必要長蔵容量 1329 体を考慮し、13 体として使用済燃料の最終的な貯蔵容量は 1365 体とした。燃料部分には高さ 1700mm の案内管を配置しており、ラック下端から上端までは 3485mm とした。

使用済燃料貯蔵プールの概念図を図 3.7.2-2 に示す。燃料昇降装置から受入れられた使用済燃料は水中台車により貯蔵ラック隣接部に搬入され、使用済燃料プール内移送機により貯蔵ラックに移送される。使用済燃料プールで貯蔵後にプラント外に搬出する時は、キャスク装荷ピットにおいて水キャスクに使用済燃料を装荷して搬出する。使用済燃料プール

の配置スペースについては貯蔵ラック、水中台車停止位置、キャスク装荷ピットを考慮して約 14.2m×10.1m×H11.8m と設定した。

(4) まとめ

ナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントにおける使用済燃料の構造概念を検討した。使用済燃料プールの最終的な貯蔵容量は貯蔵ラック 1 体当たりの貯蔵容量を 105 体として 105 体×13 基=1365 体となった。使用済燃料プールの配置スペースは貯蔵ラック、水中台車停止位置、キャスク装荷ピットを考慮して約 14.2m×10.1m×H11.8m とした。

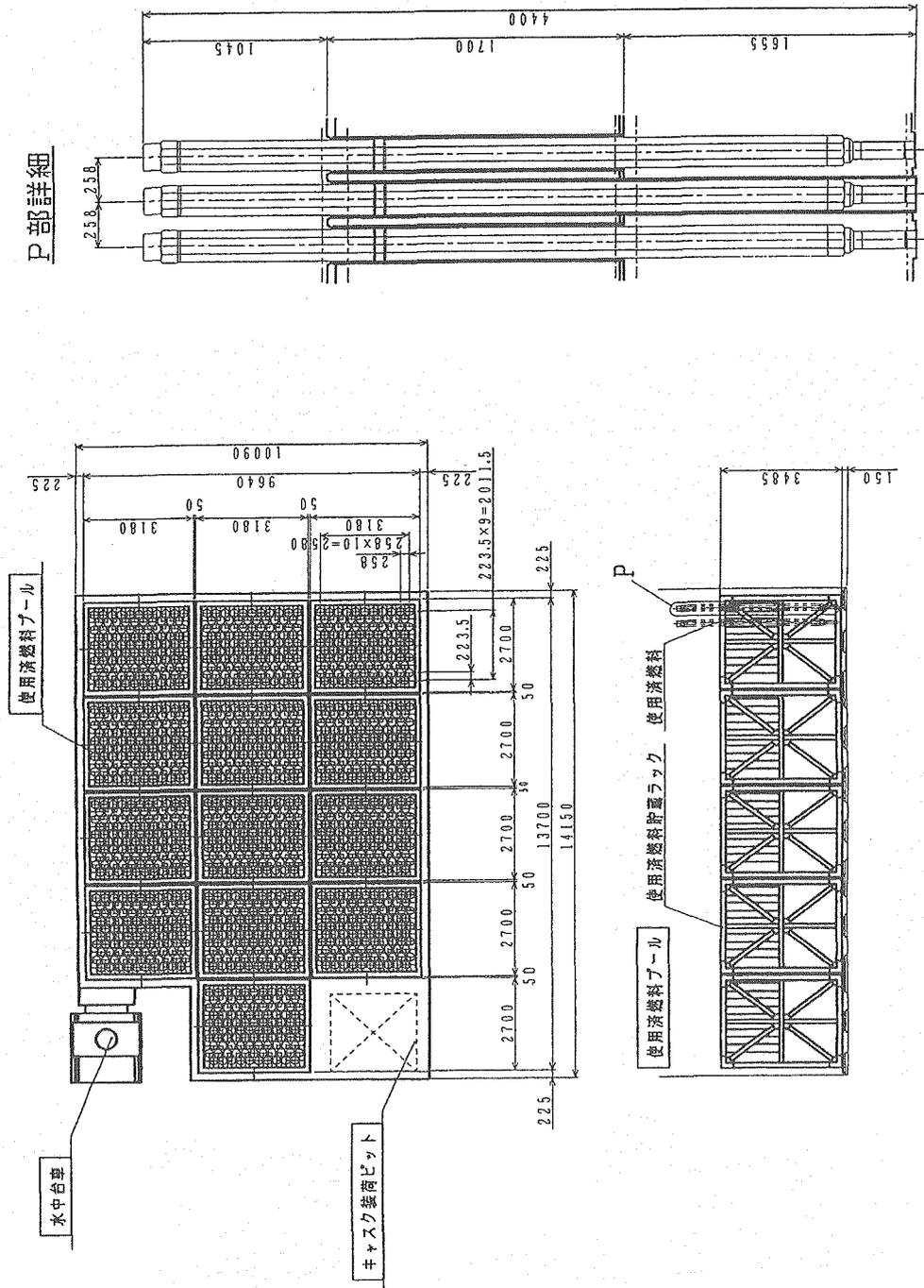


図 3.7.3-1 使用済燃料貯蔵ラック概念図

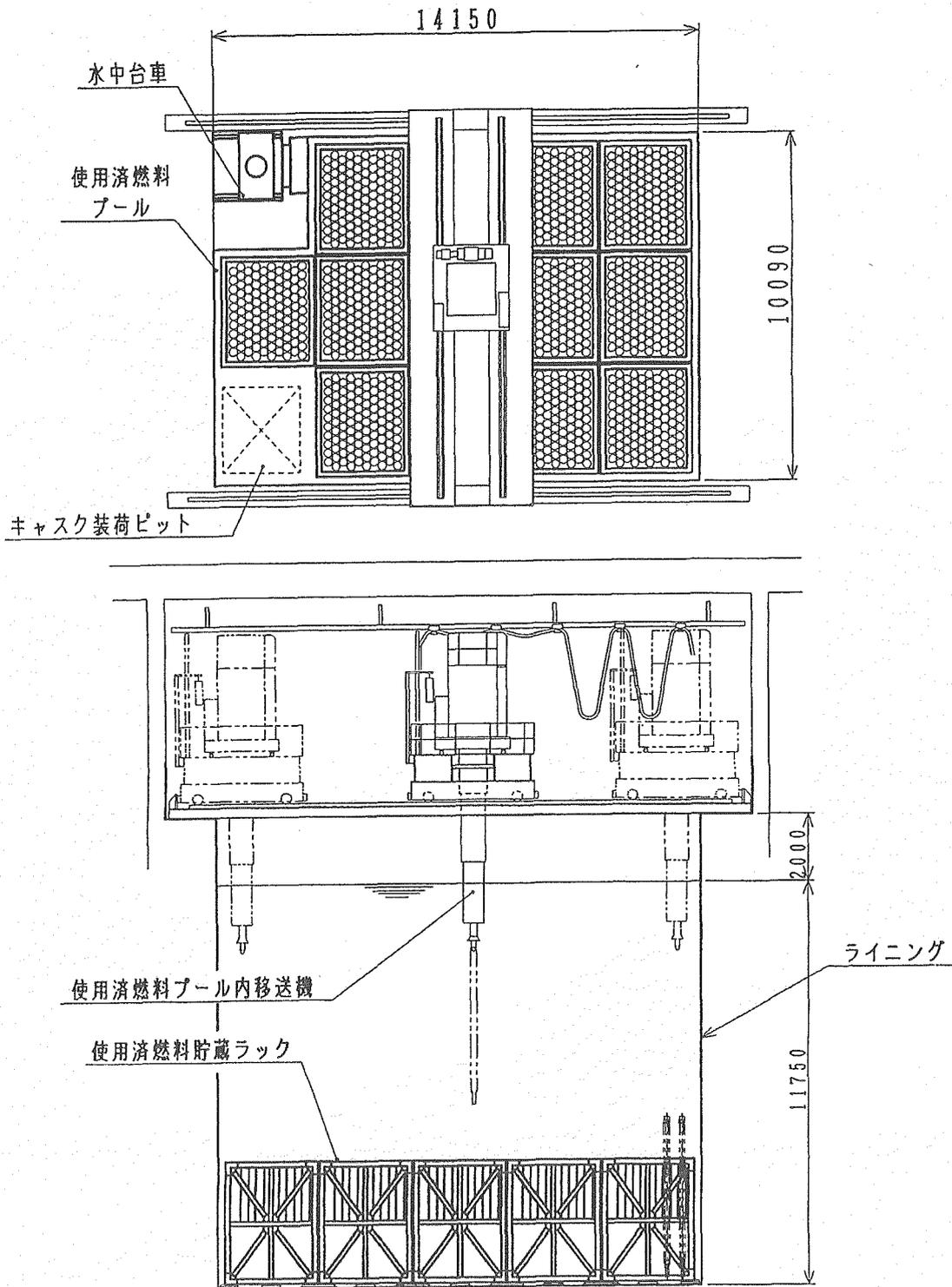


図 3.7.3-2 使用済燃料貯蔵プール概念図

3.7.4 冷却系検討

(1) 概要

ナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントにおける使用済燃料プールの冷却系の検討を行った。使用済燃料プールの運用を考慮して冷却系の除熱容量を設定し、冷却系系統構成および基本仕様を設定した。

(2) 検討条件

検討対象はナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントを対象とした。検討条件を以下にまとめる。EVST における減衰待ち貯蔵期間としては 4kW/体および 5kW/体を対象として冷却系については 5kW/体に対応可能な容量を検討した。燃料交換の運用としては除熱量がもっとも大きく評価される 4 モジュール連続燃料交換を想定して評価した。

- ・ 検討対象 : ナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラント
- ・ 炉心集合体数 : 333 体/炉心
- ・ 1 バッチ集合体数 : 84 体/バッチ
- ・ バッチ数 : 4 バッチ
- ・ 運転サイクル期間 : 26 ヶ月
- ・ 減衰待ち貯蔵期間 : 15 ヶ月 (5kW/体)、21 ヶ月 (4kW/体)
- ・ プラント貯蔵容量 : 1671 体 (3.7.1 項参照)
- ・ 使用済燃料プール貯蔵容量 : 1365 体 (3.7.3 項参照、設計貯蔵容量)
- ・ 燃料交換運用 : 4 モジュール連続燃料交換
- ・ 使用済燃料プール温度 : 65°C
- ・ 系統数 : 1 系統

(3) 除熱容量検討

EVST における減衰待ち期間および炉心退避をパラメータとして使用済燃料プールの運用方法を検討した結果を表 3.7.4-1~2 に示す。また、この時の使用済燃料プールの必要除熱量を評価した結果を図 3.7.4-1~2 に示す。使用済燃料プールの最大必要除熱量は EVST において 4kW/体まで減衰する場合は 0.88MW、5kW/体まで減衰する場合は 1.65MW と評価された。

(4) 炉心退避時除熱容量検討

炉心退避時の冷却系除熱容量を検討した。検討条件として EVST において 5kW/体まで集合体発熱量を減衰することを前提として評価を行った。もっとも厳しい想定として 1 号、2 号モジュールの連続燃料交換後に 3 号モジュールにおいて異常が発生することを仮定した。使用済燃料プールの運用方法を検討した結果を表 3.7.4-1~2 に示す。また、この時の使用済燃料プールの必要除熱量を評価した結果を図 3.7.4-1~2 に示す。炉心退避時の運用とし

ては EVST にいて 5kW/体まで集合体発熱量を減衰することを前提とすると、炉心退避決定時に EVST に貯蔵されている燃料を 5kW/体に減衰した後、使用済燃料プールに移送しその後 EVST に対して炉心退避が行われる。この時の使用済燃料の最大除熱量は 1.53MW と評価され、通常運用時の 1.65MW を越えないことが明らかになった。

ただし、3.4.4 項で早期炉心退避に対応として検討した炉心から使用済燃料プールへの直接移送を行う場合には大幅に除熱容量が増加する可能性がある。

(5) 系統構成検討

除熱容量 1.65MW、使用済燃料プール温度 65℃として使用済燃料プールの冷却系を検討した。系統構成図を図 3.7.4-1 にヒートマスバランス図を図 3.7.4-2 に示す。使用済燃料プール冷却系は 1 系統として、非常用空調冷水系とは独立した使用済燃料プール専用の 2 次冷却系を設置し冷却水により除熱する。また、系統内に浄化系としてのろ過器および脱塩器を設置して使用済燃料プールの水質を管理する。

主要機器としては使用済燃料冷却系循環ポンプ 2 基、熱交換器 2 基、冷却水循環ポンプ 2 基、冷却塔 2 基とし、動的機器は非常用ガスタービンから給電が可能な電源構成とする。使用済燃料プール冷却系の循環ポンプ仕様および熱交換器仕様を表 3.7.4-4、表 3.7.4-5 に示す。また、使用済燃料プール浄化系の浄化能力を表 3.7.4-6 に示す。ナトリウム冷却中型炉では被覆管材料として ODS 鋼を採用している。今後の課題として ODS 鋼の耐腐食性能を考慮した浄化系の仕様の設定が必要であると考えられる。

(6) まとめ

ナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントにおける使用済燃料プールの冷却系の検討を行った。除熱容量はもっとも厳しい運用として EVST から 5kW/体取出し、4 モジュール連続燃料交換を想定して 1.65MW と評価された。今後の課題として ODS 鋼の耐腐食性能を考慮した浄化系の仕様の設定が必要であると考えられる。

表 3.7.4-1 (1/4) 使用済燃料プール運用 (EVST 取出時 4kW/体)

工程:	炉停止後日数(1,2)	モジュール1,2	炉停止後日数(3,4)	モジュール3,4
0.0日	(1日目)	原子炉停止(モジュール1,2)		
8.1日	(9日目)	燃料交換準備開始(1サイクル目)		
17.0日	(18日目)	制御棒交換開始(モジュール1)		
17.7日	(18日目)	燃料交換開始		
19.7日	(20日目)	燃料交換後始末開始		
23.7日	(24日目)	制御棒交換開始(モジュール2)		
24.4日	(25日目)	燃料交換開始		
26.4日	(27日目)	燃料交換後始末開始		
28.4日	(29日目)	燃料交換後始末完了		
32.0日	(33日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)	(1日目)	原子炉停止(モジュール3,4)
40.1日			(9日目)	燃料交換準備開始(1サイクル目)
49.0日			(18日目)	制御棒交換開始(モジュール3)
49.7日			(18日目)	燃料交換開始
51.7日			(20日目)	燃料交換後始末開始
55.7日			(24日目)	制御棒交換開始(モジュール4)
56.4日			(25日目)	燃料交換開始
58.4日			(27日目)	燃料交換後始末開始
60.4日			(29日目)	燃料交換後始末完了
64.0日			(33日目)	原子炉再起動(モジュール3,4)
640.0日	(641日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(4kW取出想定時)		
647.6日	(648日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(4kW取出想定時)		
672.0日			(641日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(4kW取出想定時)
679.6日			(648日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(4kW取出想定時)
823.0日	(1日目)	原子炉停止(モジュール1,2)(原子炉再起動から791日後)		
831.1日	(9日目)	燃料交換準備開始(2サイクル目)		
840.0日	(18日目)	制御棒交換開始(モジュール1)		
840.7日	(18日目)	燃料交換開始		
842.7日	(20日目)	燃料交換後始末開始		
846.7日	(24日目)	制御棒交換開始(モジュール2)		
847.4日	(25日目)	燃料交換開始		
849.4日	(27日目)	燃料交換後始末開始		
851.4日	(29日目)	燃料交換後始末完了		
855.0日	(33日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)	(1日目)	原子炉停止(モジュール3,4)(モジュール3,4原子炉再起動から791日後)
863.1日			(9日目)	燃料交換準備開始(2サイクル目)
872.0日			(18日目)	制御棒交換開始(モジュール3)
872.7日			(18日目)	燃料交換開始
874.7日			(20日目)	燃料交換後始末開始
878.7日			(24日目)	制御棒交換開始(モジュール4)
879.4日			(25日目)	燃料交換開始
881.4日			(27日目)	燃料交換後始末開始
883.4日			(29日目)	燃料交換後始末完了
887.0日			(33日目)	原子炉再起動(モジュール3,4)
1454.4日		1サイクル目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出開始		
1462.0日		1サイクル目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出完了		
1463.0日	(631日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(4kW取出想定時)		
1470.6日	(638日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(4kW取出想定時)		
1486.4日				1サイクル目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出開始
1494.0日				1サイクル目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出完了
1495.0日			(641日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(4kW取出想定時)
1502.6日			(648日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(4kW取出想定時)

表 3.7.4-1 (2/4) 使用済燃料プール運用 (EVST 取出時 4kW/体)

1646.0 日	(1 日目)	原子炉停止(モジュール1,2)(原子炉再起動から791日後)		
1654.1 日	(9 日目)	燃料交換準備開始(3サイクル目)		
1663.0 日	(18 日目)	制御棒交換開始(モジュール1)		
1663.7 日	(18 日目)	燃料交換開始		
1665.7 日	(20 日目)	燃料交換後始末開始		
1669.7 日	(24 日目)	制御棒交換開始(モジュール2)		
1670.4 日	(25 日目)	燃料交換開始		
1672.4 日	(27 日目)	燃料交換後始末開始		
1674.4 日	(29 日目)	燃料交換後始末完了		
1678.0 日	(33 日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)	(1 日目)	原子炉停止(モジュール3,4)(モジュール3,4原子炉再起動から791
1686.1 日			(9 日目)	燃料交換準備開始(3サイクル目)
1703.1 日			(18 日目)	制御棒交換開始(モジュール3)
1720.8 日			(18 日目)	燃料交換開始
1740.5 日			(20 日目)	燃料交換後始末開始
1764.2 日			(24 日目)	制御棒交換開始(モジュール4)
1788.6 日			(25 日目)	燃料交換開始
1815.0 日			(27 日目)	燃料交換後始末開始
1843.4 日			(29 日目)	燃料交換後始末完了
1875.4 日			(33 日目)	原子炉再起動(モジュール3,4)
2277.4 日		2サイクル目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出開始		
2285.0 日		2サイクル目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出完了		
2286.0 日	(641 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(4kW取出想定時)		
2293.6 日	(648 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(4kW取出想定時)		
2309.4 日				2サイクル目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出開始
2317.0 日				2サイクル目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出完了
2318.0 日			(641 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(4kW取出想定時)
2325.6 日			(648 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(4kW取出想定時)
2469.0 日	(1 日目)	原子炉停止(モジュール1,2)(原子炉再起動から791日後)		
2477.1 日	(9 日目)	燃料交換準備開始(4サイクル目)		
2486.0 日	(18 日目)	制御棒交換開始(モジュール1)		
2486.7 日	(18 日目)	燃料交換開始		
2488.7 日	(20 日目)	燃料交換後始末開始		
2492.7 日	(24 日目)	制御棒交換開始(モジュール2)		
2493.4 日	(25 日目)	燃料交換開始		
2495.4 日	(27 日目)	燃料交換後始末開始		
2497.4 日	(29 日目)	燃料交換後始末完了		
2501.0 日	(33 日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)	(1 日目)	原子炉停止(モジュール3,4)(モジュール3,4原子炉再起動から791

表 3.7.4-1 (3/4) 使用済燃料プール運用 (EVST 取出時 4kW/体)

2509.1 日			(9 日目)	燃料交換準備開始 (4サイクル目)
2518.0 日			(18 日目)	制御棒交換開始 (モジュール1)
2518.7 日			(18 日目)	燃料交換開始
2520.7 日			(20 日目)	燃料交換後始末開始
2524.7 日			(24 日目)	制御棒交換開始 (モジュール2)
2525.4 日			(25 日目)	燃料交換開始
2527.4 日			(27 日目)	燃料交換後始末開始
2529.4 日			(29 日目)	燃料交換後始末完了
2539.0 日			(33 日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)
3100.4 日		3サイクル目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出開始		
3108.0 日		3サイクル目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出完了		
3109.0 日	(641 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(4kW取出想定時)		
3116.6 日	(648 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(4kW取出想定時)		
3132.4 日				3サイクル目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出開始
3140.0 日				3サイクル目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出完了
3141.0 日			(641 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(4kW取出想定時)
3148.6 日			(648 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ
3292.0 日	(1 日目)	原子炉停止(モジュール1,2)(原子炉再起動から791日後)		
3300.1 日	(9 日目)	燃料交換準備開始 (5サイクル目)		
3309.0 日	(18 日目)	制御棒交換開始 (モジュール1)		
3309.7 日	(18 日目)	燃料交換開始		
3311.7 日	(20 日目)	燃料交換後始末開始		
3315.7 日	(24 日目)	制御棒交換開始 (モジュール2)		
3316.4 日	(25 日目)	燃料交換開始		
3318.4 日	(27 日目)	燃料交換後始末開始		
3320.4 日	(29 日目)	燃料交換後始末完了		
3324.0 日	(33 日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)	(1 日目)	原子炉停止(モジュール3,4)(モジュール3,4原子炉再起動から791
3332.1 日			(9 日目)	燃料交換準備開始 (5サイクル目)
3341.0 日			(18 日目)	制御棒交換開始 (モジュール1)
3341.7 日			(18 日目)	燃料交換開始
3343.7 日			(20 日目)	燃料交換後始末開始
3347.7 日			(24 日目)	制御棒交換開始 (モジュール2)
3348.4 日			(25 日目)	燃料交換開始
3350.4 日			(27 日目)	燃料交換後始末開始
3352.4 日			(29 日目)	燃料交換後始末完了
3356.0 日			(33 日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)
3923.4 日		4サイクル目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出開始		
3931.0 日		4サイクル目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出完了		
3932.0 日	(641 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(4kW取出想定時)		
3939.6 日	(648 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(4kW取出想定時)		
3955.4 日				4サイクル目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出開始
3963.0 日				4サイクル目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出完了
3964.0 日			(641 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(4kW取出想定時)
3971.6 日			(648 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(4kW取出想定時)

表 3.7.4-1 (4/4) 使用済燃料プール運用 (EVST 取出時 4kW/体)

4115.0 日	(1 日目)	原子炉停止(モジュール1,2)(原子炉再起動から791日後)		
4123.1 日	(9 日目)	燃料交換準備開始(6サイクル目)		
4132.0 日	(18 日目)	制御棒交換開始(モジュール1)		
4132.7 日	(18 日目)	燃料交換開始		
4134.7 日	(20 日目)	燃料交換後始末開始		
4138.7 日	(24 日目)	制御棒交換開始(モジュール2)		
4139.4 日	(25 日目)	燃料交換開始		
4141.4 日	(27 日目)	燃料交換後始末開始		
4143.4 日	(29 日目)	燃料交換後始末完了		
4147.0 日	(33 日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)	(1 日目)	原子炉停止(モジュール3,4)(モジュール3,4原子炉再起動から791
4155.1 日			(9 日目)	燃料交換準備開始(6サイクル目)
4164.0 日			(18 日目)	制御棒交換開始(モジュール1)
4164.7 日			(18 日目)	燃料交換開始
4166.7 日			(20 日目)	燃料交換後始末開始
4170.7 日			(24 日目)	制御棒交換開始(モジュール2)
4171.4 日			(25 日目)	燃料交換開始
4173.4 日			(27 日目)	燃料交換後始末開始
4175.4 日			(29 日目)	燃料交換後始末完了
4179.0 日			(33 日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)
4746.4 日		59サイクル目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出開始		
4754.0 日		59サイクル目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出完了		
4755.0 日	(641 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(4kW取出想定時)		
4762.6 日	(648 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(4kW取出想定時)		
4778.4 日				59サイクル目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出開始
4786.0 日				59サイクル目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出完了
4787.0 日			(641 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(4kW取出想定時)
4794.6 日			(648 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(4kW取出想定時)
4938.0 日	(1 日目)	原子炉停止(モジュール1,2)(原子炉再起動から791日後)		
4946.1 日	(9 日目)	燃料交換準備開始(7サイクル目)		
4970.0 日			(1 日目)	原子炉停止(モジュール1,2)(原子炉再起動から791日後)
4978.1 日			(9 日目)	燃料交換準備開始(7サイクル目)

表 3.7.4-2 (1/4) 使用済燃料プール運用 (EVST 取出時 5kW/体)

工程:	炉停止後日数(1,2)	モジュール1,2	炉停止後日数(3,4)	モジュール3,4
0.0日	(1日目)	原子炉停止(モジュール1,2)		
8.1日	(9日目)	燃料交換準備開始(1サイクル目)		
17.0日	(18日目)	制御棒交換開始(モジュール1)		
17.7日	(18日目)	燃料交換開始		
19.7日	(20日目)	燃料交換後始末開始		
23.7日	(24日目)	制御棒交換開始(モジュール2)		
24.4日	(25日目)	燃料交換開始		
26.4日	(27日目)	燃料交換後始末開始		
28.4日	(29日目)	燃料交換後始末完了		
32.0日	(33日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)	(1日目)	原子炉停止(モジュール3,4)
40.1日			(9日目)	燃料交換準備開始(1サイクル目)
49.0日			(18日目)	制御棒交換開始(モジュール3)
49.7日			(18日目)	燃料交換開始
51.7日			(20日目)	燃料交換後始末開始
55.7日			(24日目)	制御棒交換開始(モジュール4)
56.4日			(25日目)	燃料交換開始
58.4日			(27日目)	燃料交換後始末開始
60.4日			(29日目)	燃料交換後始末完了
64.0日			(33日目)	原子炉再起動(モジュール3,4)
470.0日	(471日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(5kW取出想定時)		
477.6日	(478日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(5kW取出想定時)		
502.0日			(471日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(5kW取出想定時)
509.6日			(478日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(5kW取出想定時)
823.0日	(1日目)	原子炉停止(モジュール1,2)(原子炉再起動から791日後)		
831.1日	(9日目)	燃料交換準備開始(2サイクル目)		
840.0日	(18日目)	制御棒交換開始(モジュール1)		
840.7日	(18日目)	燃料交換開始		
842.7日	(20日目)	燃料交換後始末開始		
846.7日	(24日目)	制御棒交換開始(モジュール2)		
847.4日	(25日目)	燃料交換開始		
849.4日	(27日目)	燃料交換後始末開始		
851.4日	(29日目)	燃料交換後始末完了		
855.0日	(33日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)	(1日目)	原子炉停止(モジュール3,4)(モジュール3,4原子炉再起動から791日後)
863.1日			(9日目)	燃料交換準備開始(2サイクル目)
872.0日			(18日目)	制御棒交換開始(モジュール3)
872.7日			(18日目)	燃料交換開始
874.7日			(20日目)	燃料交換後始末開始
878.7日			(24日目)	制御棒交換開始(モジュール4)
879.4日			(25日目)	燃料交換開始
881.4日			(27日目)	燃料交換後始末開始
883.4日			(29日目)	燃料交換後始末完了
887.0日			(33日目)	原子炉再起動(モジュール3,4)
1293.0日	(471日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(5kW取出想定時)		
1300.6日	(478日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(5kW取出想定時)		
1325.0日			(471日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(5kW取出想定時)
1332.6日			(478日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(5kW取出想定時)
1460.0日		1サイクル目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出開始		
1467.6日		1サイクル目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出完了		
1492.0日				1サイクル目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出開始
1499.6日				1サイクル目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出完了

表 3.7.4-2 (2/4) 使用済燃料プール運用 (EVST 取出時 5kW/体)

1499.6 日					1サイクル目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出完了
1646.0 日	(1 日目)	原子炉停止(モジュール1,2)(原子炉再起動から791日後)			
1654.1 日	(9 日目)	燃料交換準備開始(3サイクル目)			
1663.0 日	(18 日目)	制御棒交換開始(モジュール1)			
1663.7 日	(18 日目)	燃料交換開始			
1665.7 日	(20 日目)	燃料交換後始末開始			
1669.7 日	(24 日目)	制御棒交換開始(モジュール2)			
1670.4 日	(25 日目)	燃料交換開始			
1672.4 日	(27 日目)	燃料交換後始末開始			
1674.4 日	(29 日目)	燃料交換後始末完了			
1678.0 日	(33 日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)	(1 日目)		原子炉停止(モジュール3,4)(モジュール3,4原子炉再起動から791日後)
1686.1 日			(9 日目)		燃料交換準備開始(3サイクル目)
1695.0 日			(18 日目)		制御棒交換開始(モジュール3)
1695.7 日			(18 日目)		燃料交換開始
1697.7 日			(20 日目)		燃料交換後始末開始
1701.7 日			(24 日目)		制御棒交換開始(モジュール4)
1702.4 日			(25 日目)		燃料交換開始
1704.4 日			(27 日目)		燃料交換後始末開始
1706.4 日			(29 日目)		燃料交換後始末完了
1710.0 日			(33 日目)		原子炉再起動(モジュール3,4)
2116.0 日	(471 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(5kW取出想定時)			
2123.6 日	(478 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(5kW取出想定時)			
2148.0 日			(471 日目)		EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(5kW取出想定時)
2155.6 日			(478 日目)		EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(5kW取出想定時)
2283.0 日		2サイクル目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出開始			
2290.6 日		2サイクル目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出完了			
2315.0 日					2サイクル目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出開始
2322.6 日					2サイクル目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出完了
2469.0 日	(1 日目)	原子炉停止(モジュール1,2)(原子炉再起動から791日後)			
2477.1 日	(9 日目)	燃料交換準備開始(4サイクル目)			
2486.0 日	(18 日目)	制御棒交換開始(モジュール1)			
2486.7 日	(18 日目)	燃料交換開始			
2488.7 日	(20 日目)	燃料交換後始末開始			
2492.7 日	(24 日目)	制御棒交換開始(モジュール2)			
2493.4 日	(25 日目)	燃料交換開始			
2495.4 日	(27 日目)	燃料交換後始末開始			
2497.4 日	(29 日目)	燃料交換後始末完了			
2501.0 日	(33 日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)	(1 日目)		原子炉停止(モジュール3,4)(モジュール3,4原子炉再起動から791日後)
2509.1 日			(9 日目)		燃料交換準備開始(4サイクル目)
2518.0 日			(18 日目)		制御棒交換開始(モジュール1)
2518.7 日			(18 日目)		燃料交換開始
2520.7 日			(20 日目)		燃料交換後始末開始
2524.7 日			(24 日目)		制御棒交換開始(モジュール2)
2525.4 日			(25 日目)		燃料交換開始
2527.4 日			(27 日目)		燃料交換後始末開始
2529.4 日			(29 日目)		燃料交換後始末完了
2533.0 日			(33 日目)		原子炉再起動(モジュール1,2)
2939.0 日	(471 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(5kW取出想定時)			
2946.6 日	(478 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(5kW取出想定時)			
2971.0 日			(471 日目)		EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(5kW取出想定時)
2978.6 日			(478 日目)		EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(5kW取出想定時)
3106.0 日		3サイクル目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出開始			

表 3.7.4-2 (3/4) 使用済燃料プール運用 (EVST 取出時 5kW/体)

3113.6 日		394炉目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出完了		
3138.0 日				394炉目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出開始
3145.6 日				394炉目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出完了
3292.0 日	(1 日目)	原子炉停止(モジュール1,2)(原子炉再起動から791日後)		
3300.1 日	(9 日目)	燃料交換準備開始(5サイクル目)		
3309.0 日	(18 日目)	制御棒交換開始(モジュール1)		
3309.7 日	(18 日目)	燃料交換開始		
3311.7 日	(20 日目)	燃料交換後始末開始		
3315.7 日	(24 日目)	制御棒交換開始(モジュール2)		
3316.4 日	(25 日目)	燃料交換開始		
3318.4 日	(27 日目)	燃料交換後始末開始		
3320.4 日	(29 日目)	燃料交換後始末完了		
3324.0 日	(33 日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)	(1 日目)	原子炉停止(モジュール3,4)(モジュール3,4原子炉再起動から791日後)
3332.1 日			(9 日目)	燃料交換準備開始(5サイクル目)
3341.0 日			(18 日目)	制御棒交換開始(モジュール1)
3341.7 日			(18 日目)	燃料交換開始
3343.7 日			(20 日目)	燃料交換後始末開始
3347.7 日			(24 日目)	制御棒交換開始(モジュール2)
3348.4 日			(25 日目)	燃料交換開始
3350.4 日			(27 日目)	燃料交換後始末開始
3352.4 日			(29 日目)	燃料交換後始末完了
3356.0 日			(33 日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)
3762.0 日	(471 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(5kW取出額定時)		
3769.6 日	(478 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(5kW取出額定時)		
3794.0 日			(471 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(5kW取出額定時)
3801.6 日			(478 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(5kW取出額定時)
3929.0 日		494炉目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出開始		
3936.6 日		494炉目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出完了		
3961.0 日				494炉目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出開始
3968.6 日				494炉目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出完了
4115.0 日	(1 日目)	原子炉停止(モジュール1,2)(原子炉再起動から791日後)		
4123.1 日	(9 日目)	燃料交換準備開始(6サイクル目)		
4132.0 日	(18 日目)	制御棒交換開始(モジュール1)		
4132.7 日	(18 日目)	燃料交換開始		
4134.7 日	(20 日目)	燃料交換後始末開始		
4138.7 日	(24 日目)	制御棒交換開始(モジュール2)		
4139.4 日	(25 日目)	燃料交換開始		
4141.4 日	(27 日目)	燃料交換後始末開始		
4143.4 日	(29 日目)	燃料交換後始末完了		
4147.0 日	(33 日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)	(1 日目)	原子炉停止(モジュール3,4)(モジュール3,4原子炉再起動から791日後)

表 3.7.4-2 (4/4) 使用済燃料プール運用 (EVST 取出時 5kW/体)

4155.1 日			(9 日目)	燃料交換準備開始 (6サイクル目)
4164.0 日			(18 日目)	制御棒交換開始 (モジュール1)
4164.7 日			(18 日目)	燃料交換開始
4166.7 日			(20 日目)	燃料交換後始末開始
4170.7 日			(24 日目)	制御棒交換開始 (モジュール2)
4171.4 日			(25 日目)	燃料交換開始
4173.4 日			(27 日目)	燃料交換後始末開始
4175.4 日			(29 日目)	燃料交換後始末完了
4179.0 日			(33 日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)
4585.0 日	(471 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(5kW取出想定時)		
4592.6 日	(478 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(5kW取出想定時)		
4617.0 日			(471 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(5kW取出想定時)
4624.6 日			(478 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(5kW取出想定時)
4752.0 日		591kW目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出開始		
4759.6 日		591kW目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出完了		
4784.0 日				591kW目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出開始
4791.6 日				591kW目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出完了
4938.0 日	(1 日目)	原子炉停止(モジュール1,2)(原子炉再起動から791日後)		
4946.1 日	(9 日目)	燃料交換準備開始 (7サイクル目)		
4970.0 日			(1 日目)	原子炉停止(モジュール1,2)(原子炉再起動から791日後)
4978.1 日			(9 日目)	燃料交換準備開始 (7サイクル目)

表 3.7.4-3 (1/2) 使用済燃料プール運用 (炉心退避)

工程:	炉停止後日数(1,2)	モジュール1,2	炉停止後日数(3,4)	モジュール3,4
0.0 日	(1 日目)	原子炉停止(モジュール1,2)		
8.1 日	(9 日目)	燃料交換準備開始(1サイクル目)		
17.0 日	(18 日目)	制御棒交換開始(モジュール1)		
17.7 日	(18 日目)	燃料交換開始		
19.7 日	(20 日目)	燃料交換後始末開始		
23.7 日	(24 日目)	制御棒交換開始(モジュール2)		
24.4 日	(25 日目)	燃料交換開始		
26.4 日	(27 日目)	燃料交換後始末開始		
28.4 日	(29 日目)	燃料交換後始末完了		
32.0 日	(33 日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)	(1 日目)	原子炉停止(モジュール3,4)
40.1 日			(9 日目)	燃料交換準備開始(1サイクル目)
49.0 日			(18 日目)	制御棒交換開始(モジュール3)
49.7 日			(18 日目)	燃料交換開始
51.7 日			(20 日目)	燃料交換後始末開始
55.7 日			(24 日目)	制御棒交換開始(モジュール4)
56.4 日			(25 日目)	燃料交換開始
58.4 日			(27 日目)	燃料交換後始末開始
60.4 日			(29 日目)	燃料交換後始末完了
64.0 日			(33 日目)	原子炉再起動(モジュール3,4)
470.0 日	(471 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(5kW取出額定時)		
477.6 日	(478 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(5kW取出額定時)		
502.0 日			(471 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(5kW取出額定時)
509.6 日			(478 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(5kW取出額定時)
823.0 日	(1 日目)	原子炉停止(モジュール1,2)(原子炉再起動から791日後)		
831.1 日	(9 日目)	燃料交換準備開始(2サイクル目)		
840.0 日	(18 日目)	制御棒交換開始(モジュール1)		
840.7 日	(18 日目)	燃料交換開始		
842.7 日	(20 日目)	燃料交換後始末開始		
846.7 日	(24 日目)	制御棒交換開始(モジュール2)		
847.4 日	(25 日目)	燃料交換開始		
849.4 日	(27 日目)	燃料交換後始末開始		
851.4 日	(29 日目)	燃料交換後始末完了		
855.0 日	(33 日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)	(1 日目)	原子炉停止(モジュール3,4)(モジュール3,4原子炉再起動から791日後)
863.1 日			(9 日目)	燃料交換準備開始(2サイクル目)
872.0 日			(18 日目)	制御棒交換開始(モジュール3)
872.7 日			(18 日目)	燃料交換開始
874.7 日			(20 日目)	燃料交換後始末開始
878.7 日			(24 日目)	制御棒交換開始(モジュール4)
879.4 日			(25 日目)	燃料交換開始
881.4 日			(27 日目)	燃料交換後始末開始
883.4 日			(29 日目)	燃料交換後始末完了
887.0 日			(33 日目)	原子炉再起動(モジュール3,4)
1293.0 日	(471 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(5kW取出額定時)		
1300.6 日	(478 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(5kW取出額定時)		
1325.0 日			(471 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(5kW取出額定時)
1332.6 日			(478 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(5kW取出額定時)
1460.0 日		1919年目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出開始		
1467.6 日		1919年目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出完了		
1492.0 日				1919年目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出開始
1499.6 日				1919年目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出完了

表 3.7.4-3 (2/2) 使用済燃料プール運用 (炉心退避)

1499.6 日				1サイクル目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出完了
1646.0 日	(1 日目)	原子炉停止(モジュール1,2)(原子炉再起動から791日後)		
1654.1 日	(9 日目)	燃料交換準備開始 (3サイクル目)		
1663.0 日	(18 日目)	制御棒交換開始 (モジュール1)		
1663.7 日	(18 日目)	燃料交換開始		
1665.7 日	(20 日目)	燃料交換後始末開始		
1669.7 日	(24 日目)	制御棒交換開始 (モジュール2)		
1670.4 日	(25 日目)	燃料交換開始		
1672.4 日	(27 日目)	燃料交換後始末開始		
1674.4 日	(29 日目)	燃料交換後始末完了		
1678.0 日	(33 日目)	原子炉再起動(モジュール1,2)	(1 日目)	原子炉停止(モジュール3,4)(モジュール3,4原子炉再起動から791日
1686.1 日			(9 日目)	燃料交換準備開始 (3サイクル目)
1695.0 日			(18 日目)	制御棒交換開始 (モジュール3)
1695.7 日			(18 日目)	燃料交換開始
1697.7 日			(20 日目)	燃料交換後始末開始
1701.7 日			(24 日目)	制御棒交換開始 (モジュール4)
1702.4 日			(25 日目)	燃料交換開始
1704.4 日			(27 日目)	燃料交換後始末開始
1706.4 日			(29 日目)	燃料交換後始末完了
1710.0 日			(33 日目)	原子炉再起動(モジュール3,4)
1720.0 日			(43 日目)	原子炉異常停止(モジュール3)
	10日			(モジュール原子炉停止又は避難)
	炉内検査30日			炉心退避決定(モジュール3)
1750.0 日			(73 日目)	
2116.0 日	(471 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出開始(5kW取出想定時)		
2123.6 日	(478 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへ取出完了(5kW取出想定時)		
		ダミ燃料準備35日:196体		
2158.6 日			(481 日目)	炉心退避開始 (モジュール3:196体EVSTへ)
2163.3 日			(486 日目)	炉心退避完了 (196体) EVST減衰後炉心燃料の水プールへモジュール3,4の内137体取出開始
2169.6 日			(492 日目)	EVST減衰後炉心燃料の水プールへモジュール3,4の内137体取出完了
		ダミ燃料準備25日:137体		
2194.6 日			(517 日目)	炉心退避開始 (モジュール3:137体EVSTへ炉心退避継続)
2197.9 日			(520 日目)	炉心退避完了 (137体)
2283.0 日		2サイクル目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出開始		
2290.6 日		2サイクル目モジュール1,2:4年冷却後水プールから搬出完了		
2315.0 日				2サイクル目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出開始
2322.6 日				2サイクル目モジュール3,4:4年冷却後水プールから搬出完了
				モジュール3のEVSTへの炉心退避完了後の運用方法により4サイクル目からのサイクルモジュールが決定する。 モジュール3炉心:ダミ燃料、 モジュール4炉心:燃料
2469.0 日	(1 日目)	原子炉停止(モジュール1,2)(原子炉再起動から791日後)		
2477.1 日		(4サイクル目)		
2486.0 日		燃料交換は行わない。		
2486.7 日				
2488.7 日				
2492.7 日				
2493.4 日				
2495.4 日				(異常停止時モジュール4継続の場合)
2497.4 日			(1 日目)	原子炉停止(モジュール4)(モジュール4原子炉再起動から791日後)
2501.0 日				

表 3.7.4-4 使用済燃料プール冷却系循環ポンプ仕様

項目	仕様
型式	片吸込渦巻式
数量	2基
設計流量	260m ³ /h
設計揚程	70m
電動機	3相誘導電動機 90kW
主要材質	ステンレス

表 3.7.4-5 使用済燃料プール冷却系熱交換器仕様

項目	仕様
型式	プレート式熱交換器
数量	2基
交換熱量	1.65MW
1次側設計流量	260m ³ /h
2次側設計流量	280m ³ /h
伝熱面積	30.4m ² /基
伝熱プレート枚数	64枚
寸法	W710mm×H1390mm×L1000mm
主要材質	ステンレス

表 3.7.4-6 使用済燃料プール浄化系仕様

項目	仕様
構成機器	ろ過器 (50%×2基) 脱塩器 (50%×2基) 樹脂供給ホッパ 廃液移送ポンプ 廃液廃樹脂タンク
PH	5.3~7.5 (25℃)
電気伝導度	3 μ S/cm 以下 (25℃)
塩素イオン	0.5ppm 以下
懸濁固形分	1.0ppm 以下

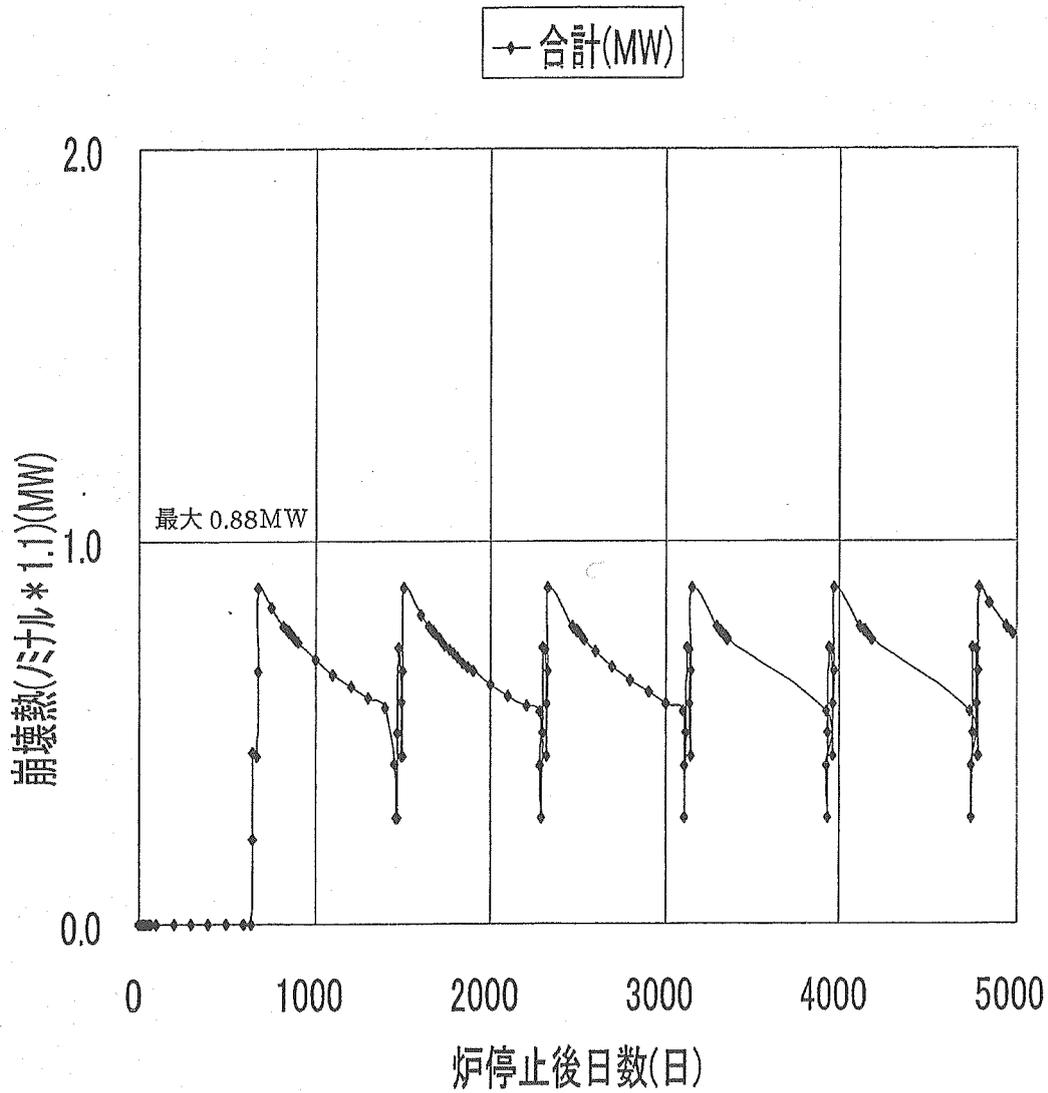


図 3.7.4-1 使用済燃料プール除熱量評価 (EVST 取出時 4kW/体)

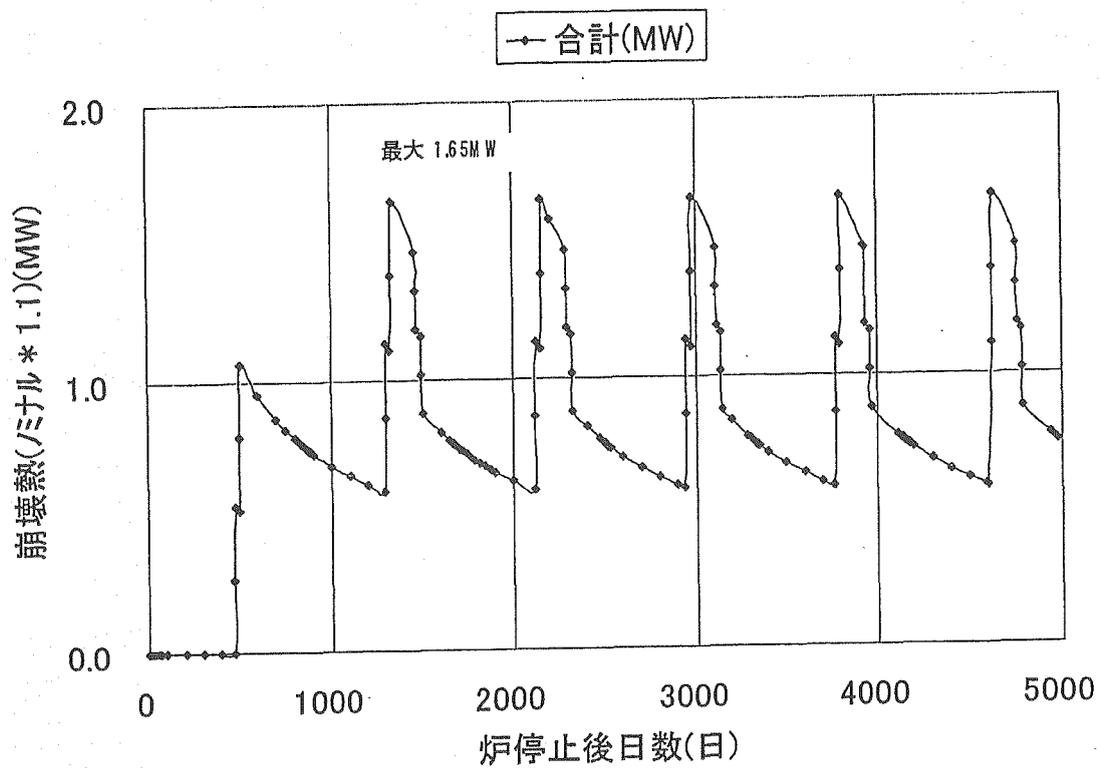


図 3.7.4-2 使用済燃料プール除熱量評価 (EVST 取出時 5kW/体)

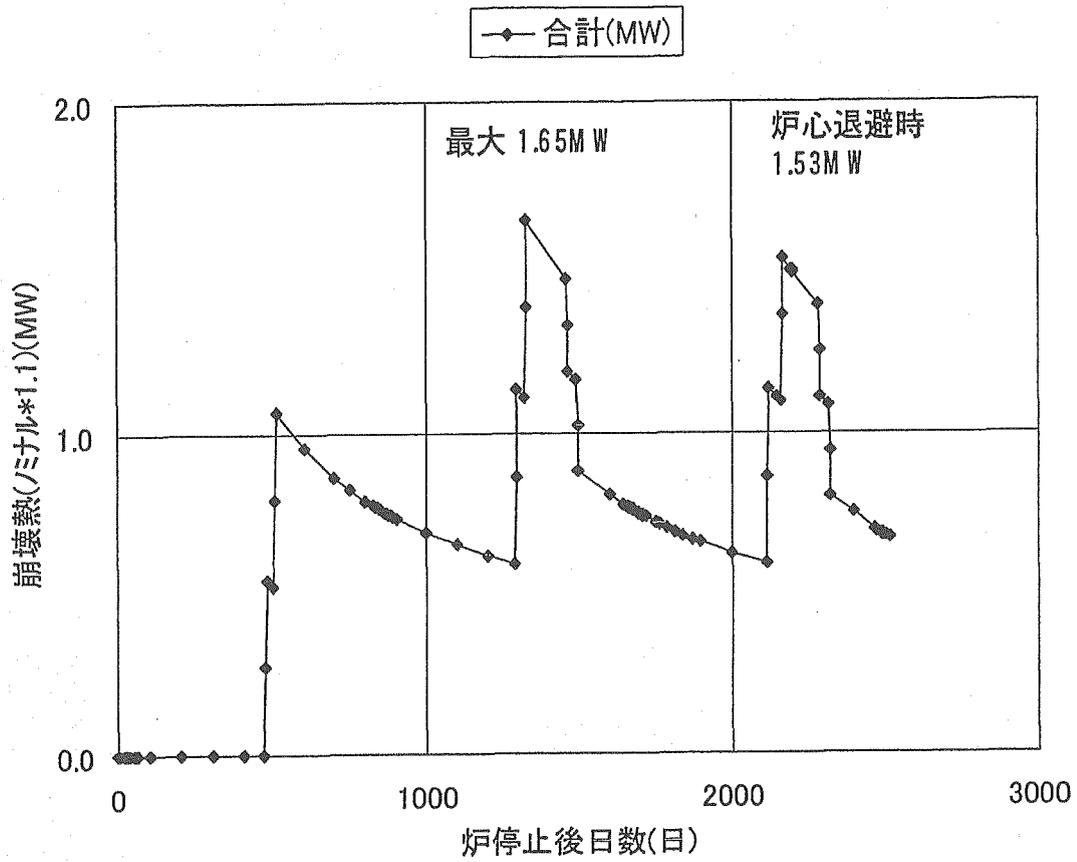


図 3.7.4-3 使用済燃料プール除熱量評価 (炉心退避時)

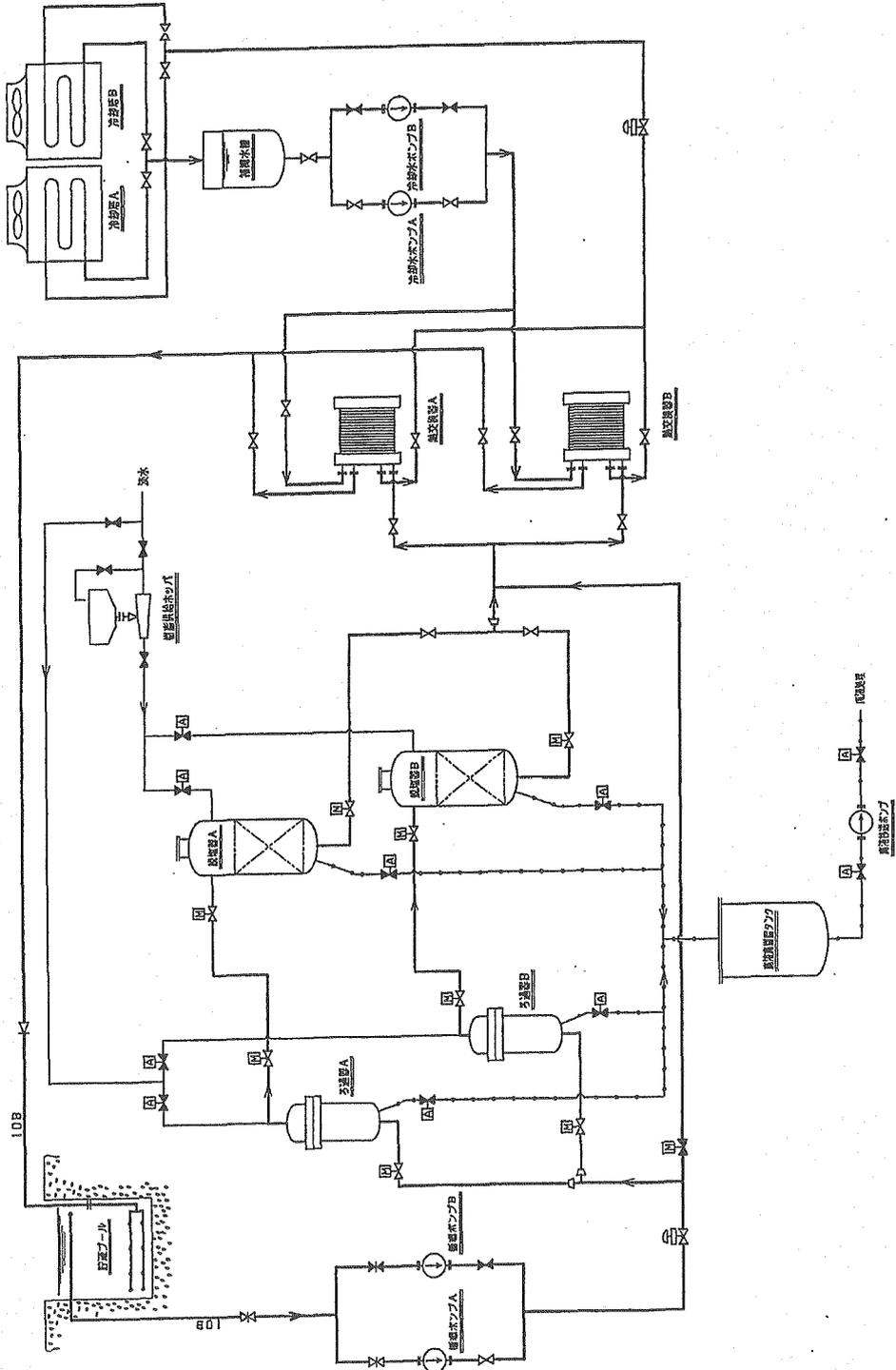


図 3.7.4-4 使用済燃料プール冷却系統図

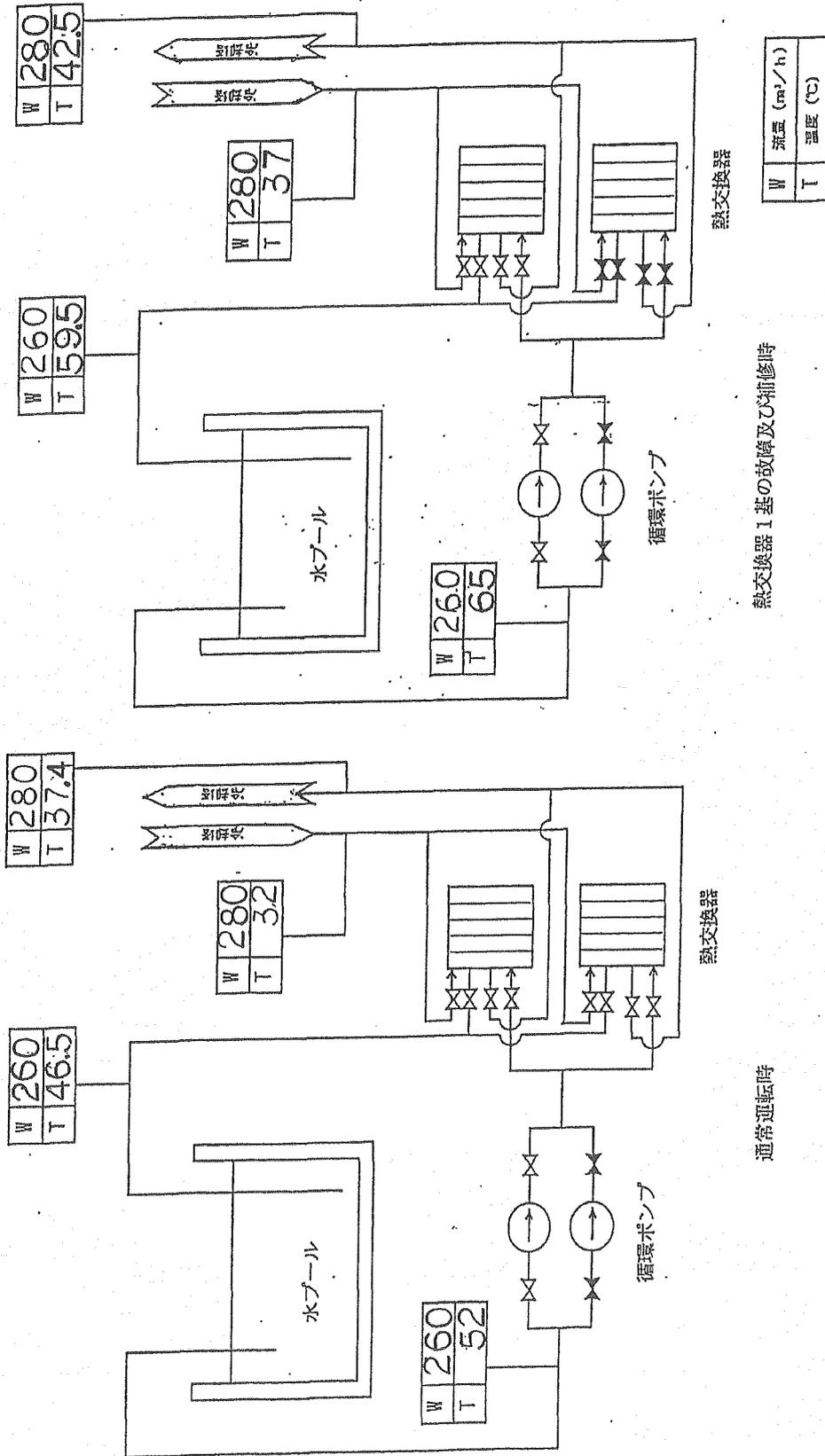


図 3.7.4-5 使用済燃料プール冷却系ヒートマスバランス図

3.8 全体システム

(1) 概要

ナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントに適合した EVST 方式による燃料貯蔵設備の全体システムをまとめた。

(2) 基本構成

EVST 方式による燃料取扱設備の主要仕様を表 3.8-1、全体システム概念図を図 3.8-1 に示す。燃料交換機は切込み付炉心上部機構に適合したマニプレータ式燃料交換機を用い炉心から炉内中継装置までの燃料移送を行う。耐震評価の結果、地震時に炉心上部機構と燃料交換機の干渉について燃料交換機軸受のガタの影響が明らかになった。燃料交換機軸受はナトリウムミストを含むアルゴンガス中で稼動するため、無潤滑ガタなし軸受けの成立性を試験等により確認する必要がある。

炉内中継装置は複数体移送方式に適合した固定ラック式として駆動部分がないため原子炉容器に常設することとした。燃料交換機との干渉を回避するため切欠き部を有するが、補強管を設置する等の対策により構造健全性を確保可能な見通しである。

燃料出入機はモジュールプラントに適合した概念としてレールレス方式を採用した。使用済燃料 2 体を収納したナトリウムポットを原子炉容器からナトリウムポット取扱設備まで移送し、EVST に燃料を装荷する。レールレス方式では移動の自由度が多い分位置決め方法も複雑になると考えられる。また、地震時にレールフックによらずに転倒防止する対策を検討する必要がある。

EVST では 5kW まで使用済燃料発熱量を減衰貯蔵する。貯蔵容量は 4 モジュールの連続燃料交換に対応した 370 体を確保した。液位制御型移送装置を採用して EVST 容器の軸長を低減した。また、事故時に 450°C を許容する設計を行えば冷却系を大幅に削減可能なため 450°C のナトリウム温度に対応可能な、鋼製遮へいによる EVST プラグを検討した。

EVST で減衰後の燃料は EVST 上部床に燃料出入機を接続してアルゴンガスにより乾式洗浄する。その後燃料出入機で裸燃料を直接冷却しつつ燃料昇降装置まで移動し、燃料昇降装置に燃料を受け渡す。燃料昇降装置において水浸漬温度まで冷却したのち水浸漬し使用済燃料プールに燃料の装荷を完了する。水浸漬後は燃料昇降装置を乾燥することで燃料出入機と使用済燃料プールの雰囲気分離を行う。水浸漬条件および水プール貯蔵条件については従来知見はオーステナイト鋼を対象としているため今後 ODS 鋼に対応した条件を整理する必要がある。また、燃料昇降装置における雰囲気分離方法を具体化する必要がある。

また、低除染燃料を取扱う場合には、新燃料の発熱量が大きいため新燃料取扱設備に対策が必要になる可能性があり、今後検討する必要がある。

(3) 燃料交換時間

燃料交換時間の評価結果を表 3.8-2 に示す。3 燃料交換時間は複数体移送方式 (2 体移送)

を採用しているため低減されており（単体移送等の比較については 3.2.4 項参照）、1 集合体当たり約 31 分と評価された。

EVST 方式では原子炉運転中において燃料交換時の原子炉から EVST 間の燃料移送以外に、EVST から使用済燃料プールへの燃料移送を行う必要がある。EVST 方式の運用スケジュールを図 3.8-2（4 モジュール連続燃料交換のケース）に示す。以下の取扱を実施する必要がある。（4 モジュールあたりの数値）

- ・EVST から使用済燃料プールへの使用済燃料の移送（336 体）：31 日（原子炉停止 470 日以降に実施可能）^{注1)}
- ・使用済燃料プールからの使用済燃料の搬出（448 体）：100 日
- ・EVST への新燃料の搬入（336 体）^{注1)}：60 日

EVST は、4 バッチ燃料交換分の貯蔵容量しか有しておらず、4 モジュールの運用方法によって、空きスペース数や、その発生時期が相違するため、運用方法への制限の有無を確認する必要があるが、図 3.8-1 に示したように、作業空き時間が大きく、いずれの運用方法でも対応可能と考えられる。

注 1) 制御棒について、EVST から使用済燃料プールへの移動及び EVST への搬入は、定検期間中に実施

(4) まとめ

ナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントに適合する燃料取扱設備として EVST 方式による燃料取扱設備全体システムおよび課題をまとめた。

表 3.8-1 燃料取扱設備の主要仕様

対象			仕様		
炉内燃料移送系	炉内燃料移送方式		切込み付きコラム型炉心上部機構 + 単回転プラグ+燃料交換機		
	燃料交換機	型式	マニプレータ式		
		アーム長	1690mm		
	炉内中継装置		型式	固定ラック式(複数体移送)	
炉外燃料移送系	炉外燃料移送方式		燃料出入機+燃料昇降装置		
	燃料出入機	型式	レールレス台車式		
		収納筒数	1基		
		取扱対象	Naポット入り高発熱燃料(22.5kW) ガス中裸状態の低発熱燃料(5kW)		
		取扱体数	高発熱燃料:2体 低発熱燃料:1体		
	冷却系統数	Arガス直接冷却系×2系統、空気間 接冷却系×2系統 ¹⁾			
	燃料昇降装置	型式	ワイヤロープ巻上式		
		取扱対象	ガス中裸状態の低発熱燃料(5kW)		
		取扱体数	1体		
	Naポット	冷却系統数	Arガス直接冷却系×2系統		
		型式	フィン付き複数体ポット		
収納体数		2体			
ポット形状		φ560mm(フィン外接円φ580mm) ×h4690mm			
燃料貯蔵系	貯蔵方式		EVST貯蔵方式(EVST+水プール)		
	EVST	本体	型式	円筒縦型Na容器	
			貯蔵方式	裸燃料段違い貯蔵方式(正方配列、 貯蔵ピッチ343mm)	
			貯蔵容量	370体(破損燃料を含む)	
			容器形状	φ6.86m×h12.07m	
			槽内移送方式	回転ラック+ターンテーブル+液面 制御型直動式槽内移送機	
		冷却系	冷却方式	直浸コイル内2次Na循環空冷式	
			冷却系統数	3系統	
			除熱容量	通常運転時:1.9MW/系統 事故時:3.8MW/系統	
		純化系	運転方式	2系統強制循環+1系統循環待機	
			空気冷却器型式	フィン付きUチューブ二重伝熱管	
	水プール	本体	1次ナトリウム	窒素ガス強制冷却・一体型コールド トラップ(EVSTに設置)	
			2次ナトリウム	空気強制冷却・一体型コールドラッ プ(2次ドレンタンクに設置)	
		冷却浄化系	型式	ライナー張り縦型貯蔵式	
			貯蔵容量	1365体	
プール形状			w14.15m×d10.09m×h13.75m		
冷却浄化方式	浄化系先行型、1次冷却水系と2次 冷却水系の組み合わせ				
冷却系統数	1系統(循環ポンプ、熱交換器は2基 設置)				
除熱容量	1.65MW				
燃料処理系	燃料洗浄		洗浄方式	乾式洗浄(Arガスブロー洗浄)	
			洗浄系統数	2系統(燃料出入機の冷却系利用)	
			洗浄時ガス温度	300℃(洗浄性能50%)	
	燃料検査		検査方式	X線CT(Naポット入り状態で検査)	

注1) 高発熱燃料取扱時は空気間接冷却系のみ運転

表3.8-2 燃料交換時間評価

大項目	項目	単位	単体移送	複数体移送
移動距離	出入機走行距離	m		27
	出入機グリッパ昇降距離 (炉上部) (EVST上部)	m		29
	出入機グリッパ回避距離 (単体移送) (複数体移送)	m		15
機器速度	燃料交換機グリッパストローク	m		0.3
	出入機走行速度 (高速) (低速)	m/min		5.7
	出入機グリッパ昇降速度 (高速) (低速)	m/min		5.8
	燃料交換機グリッパ昇降速度 (高速) (低速)	m/min		10
	燃料交換機アームスイング速度	m/min		0.1
	移動以外の時間条件	min		6
	出入機グリッパ爪開閉時間	min		0.6
	燃料交換機グリッパ爪開閉時間	min		6
	回転ラック式炉内中継装置回転時間	min		0.6
	EVST回転ラック回転時間	min		6
ドアバルブ接続固定、ガス置換時間	min		0.6	
炉内移送時間	min		2.3	
炉外移送時間	走行・昇降時間	min	15.8	52.6
	ドアバルブ接続固定等	min	26.9	26.9
	炉内回避待ち時間	min	16.7	16.7
	小計	min	1.5	18.9
	1集合体当たり	min	44.0	61.4
	モジュール当たり	min	44.0	30.7
	モジュール当たり+準備後始末	day	3.74	2.61
	1モジュール目	day	8.74	6.61
	2モジュール目	day	17.48	13.22
	平均	day	13.11	9.92
	モジュール当たり+準備後始末	day		2.13
	2モジュール目	day		4.26
	平均	day		3.19

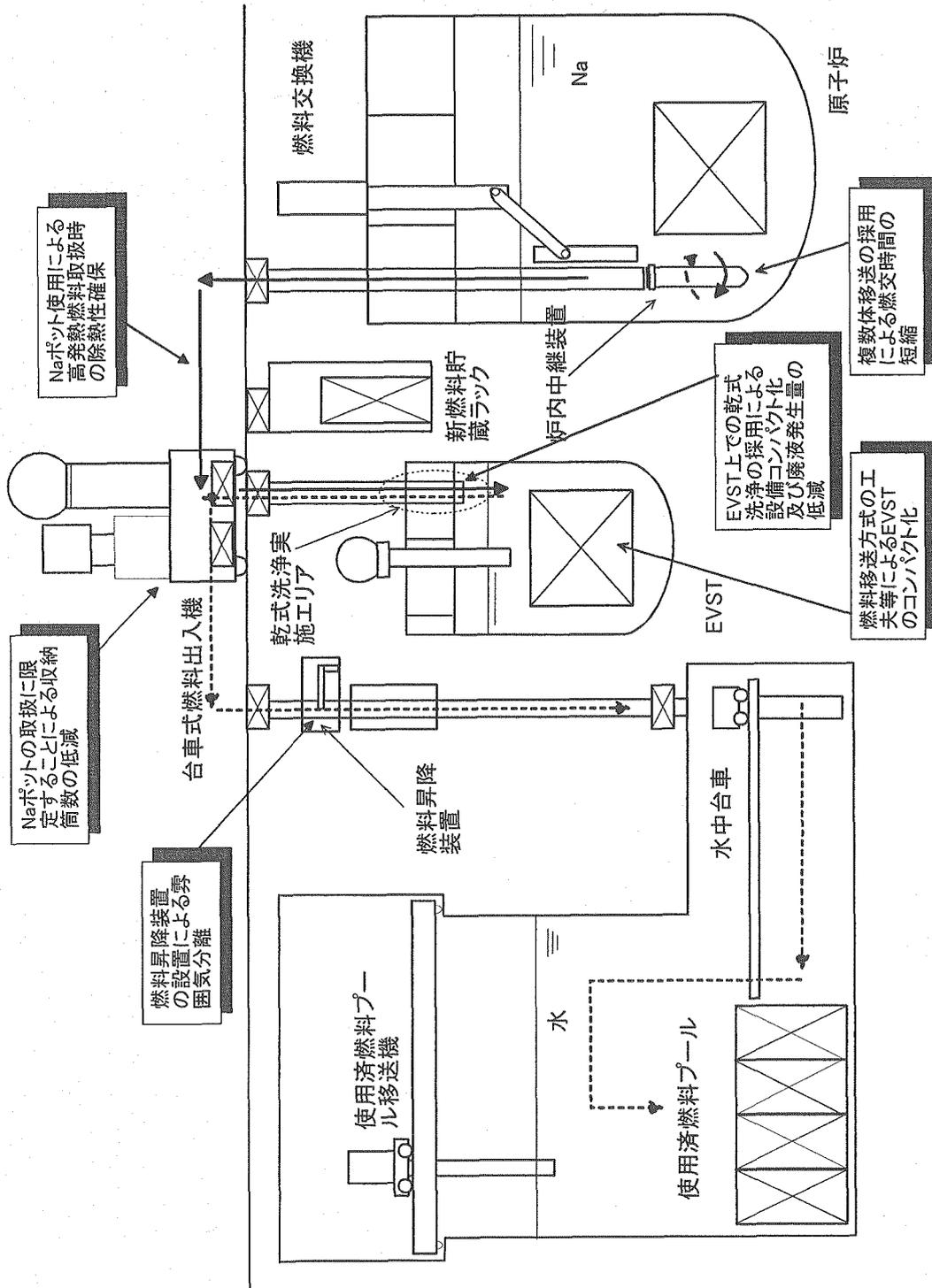


図 3.8-1 燃料取扱設備全体システム概念図

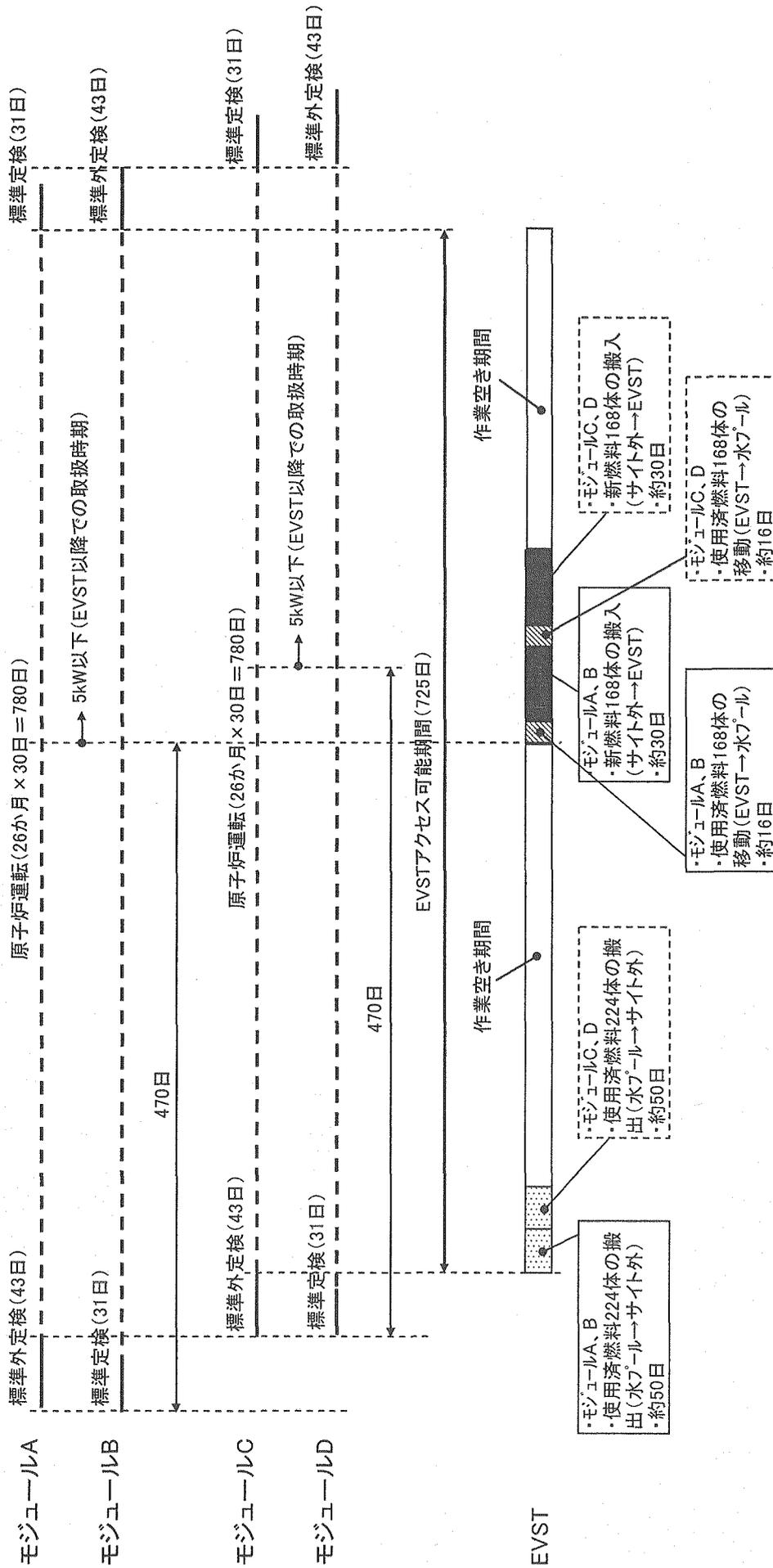


図3.8-2 EVST貯蔵方式における運用スケジュール(4バッチ連続燃料交換のケース)

4. 水プール直接貯蔵方式の検討

4.1 全体システム

(1) 概要

ナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントの燃料取扱設備の合理化を目的として、水プール直接貯蔵方式を検討した。以下では水プール直接貯蔵方式の基本構成、安全性、燃料交換時間の検討を行った。

(2) 基本構成

水プール直接貯蔵方式では、燃料交換機時に原子炉から取出した使用済燃料を使用済燃料プールまで直接移送する。水プール直接貯蔵方式の燃料取扱設備の主要仕様を表 4.1-1、全体システム概念図を図 4.1-1 に示す。

燃料交換機は EVST 方式と同様に切込み付炉心上部機構に適合したマニプレータ式燃料交換機を用い炉心から炉内中継装置までの燃料移送を行う。

炉内中継装置は EVST 方式では複数体移送方式を採用したため固定ラック式を採用したが、水プール貯蔵方式では原子炉容器からナトリウムポット取扱設備までの移送工程はクリティカルパスとならないため複数体移送方式を採用するメリットが少なく、複数体移送を行う場合はナトリウムポット取扱設備が複雑化するため単体移送方式を選定した。このため炉内中継装置は単体移送方式に適合した回転ラック式を採用した。

燃料出入機は使用済燃料を収納したナトリウムポットを原子炉容器からナトリウムポット取扱設備まで移送する設備である。EVST 方式で検討した燃料出入機はナトリウムポットと裸燃料の両方の取り扱いに対応していたが、水プール直接貯蔵方式においてはナトリウムポットのみ取り扱いとなる。

ナトリウムポット取扱設備は燃料出入機から使用済燃料を収納したナトリウムポットを受入れ回転移送機により、ガス中移送機との中継位置に移送する。使用済燃料はここでナトリウムポットから取出されガス中移送機に受け渡される。空になったナトリウムポットは回転移送機により新燃料受入れ位置に移送され新燃料を受け入れる。新燃料を収納したナトリウムポットは回転移送機により燃料出入機との中継位置に移送され燃料出入機によりナトリウムポットごと搬出される。

ガス中移送機はナトリウムポット取扱設備から使用済燃料を裸の状態ですり上げて受入れられる。燃料は未減衰の高発熱状態のため常にアルゴンガスにより直接冷却を行う。高発熱燃料を取扱うため冷却に必要なガス流量が多く、集合体内の圧力損失増加による無駄流れの増大、電源喪失時の冷却確保のための無停電電源容量への影響が懸念される。吊り上げ後はナトリウムポット取扱設備中継位置において EVST 方式と同様の乾式洗浄を実施してナトリウム付着量を 50%まで低減する。その後、冷却を行いつつ使用済燃料を燃料昇降装置中継位置まで移送し、燃料昇降装置に受け渡す。

燃料昇降装置はガス中移送機と使用済燃料プールを中継する装置で、ナトリウム雰囲気

と水雰囲気の分離および使用済燃料の水浸漬を行う。未減衰の高発熱燃料を取扱うため冷却系物量が大きくなるが基本的には EVST 方式で検討した燃料昇降装置と同等の設備である。

また、EVST 方式では新燃料を EVST において貯蔵するが、水プール貯蔵方式の場合は新燃料専用の貯蔵設備として貯蔵容量 84 体×4 バッチ+制御棒 1 炉心分=364 体の設備を確保する必要がある。

(2) 安全対応

水プール直接貯蔵方式では、燃料の発熱量が高いため、除熱機能喪失時は短時間で燃料破損となる可能性がある。使用済燃料のピーク線出力を表 4.1-2、単位長さ当たりの熱容量を表 4.1-3、温度上昇率を表 4.1-4 に示す。短期事象（24 時間以内の）の被覆管制限温度を 630℃（文献[5]）として評価した、被覆管破損までの余裕時間を表 4.1-5 に示す。22.5kW/体の高発熱燃料の場合 10 分以内に燃料被覆管制限温度に到達する。よって、ガス中裸状態の高発熱燃料を取扱うガス中移送機では、DBE で燃料破損防止、BDBE で万一の燃料発生時に事象収束するように以下の設計対応を取込んだ。水プール直接貯蔵方式の安全対応を図 4.1-2 に示す。

- ① 起因事象及び単一故障の重ね合せに対して、更なる系統・機器の多重化（「100%×2 系統」から「50%×2 基/系統（動的機器のみ）×2 系統」に変更）により、冷却機能喪失を排除する。（DBE 対応）
- ② ナトリウムポット取扱設備からの燃料吊上げ時に、ガス中移送機駆動系の故障などによる昇降スティックが発生しても、ポット昇降装置によりナトリウムポットのみを下降し、燃料冷却パスを確保する。（燃料受渡し位置における昇降系の多重化）（DBE 対応）
- ③ 全交流電源喪失対応として、専用のバッテリー電源を設置（約 2 時間の冷却機能確保）する。（BDBE 対応）
- ④ ガス中移送機や、燃料昇降装置などでの燃料落下により、万一の燃料破損が発生した場合には、非常用注水タンクから注水して、燃料熔融を防止する。（BDBE 対応）

(3) 燃料交換時間

水プール直接貯蔵方式では、原子炉から取出した使用済燃料を使用済燃料プールまで直接移送するため、燃料交換時に、原子炉からナトリウムポット取扱設備間の燃料移送以外に、新燃料の予熱、使用済燃料のナトリウム洗浄・冷却・水中浸漬など全燃料取扱作業を実施しなければならず、燃料交換期間の延長や、燃料交換作業の煩雑化を招く恐れを有している。燃料交換時間の検討条件を表 4.1-6 に示す。

燃料交換スケジュールを図 4.1-3 に示す。燃料交換時間は 1 体当たり 45 分と評価された。

燃料交換スケジュール上、1基のガス中移送機で対応するには、ナトリウムポット取扱設備での燃料引抜きから水浸漬まで約25分の時間余裕しかない。乾式洗浄による洗浄時間は約20分であるため5分程度で他の工程を終了する必要がある。燃料洗浄後は水浸漬温度は350℃（文献[9]）としているため水浸漬時間を考慮して約300℃まで冷却する必要がある。冷却時間を評価した結果を表4.1-7に示す。冷却ガスの高速化に伴い、約6分で燃料洗浄時の被覆管温度450℃から300℃以下まで降温することが可能である。よって、時間余裕はないが、ナトリウムポット取扱設備以降、1基の走行式ガス中移送機でも約25分の時間内に一連の作業を終了でき、所定の燃料交換時間を満足する可能性を有すると判断した。ただし、本検討ではガス中移送機から使用済燃料プールに燃料を受け渡す際の雰囲気分離方法および必要時間を十分検討していない。ガス中移送機と使用済燃料プールの雰囲気を分離するためには、燃料昇降装置の乾燥が必要となる。今後、雰囲気分離方法および必要時間を評価した上で燃料取扱時間を再評価する必要がある。

(4) まとめ

燃料取扱設備合理化案として水プール直接貯蔵方式を検討した。高発熱燃料を裸で取扱うガス中移送機においては冷却に必要なガス流量が多く、集合体内の圧力損失増加による無駄流れの増大、電源喪失時の冷却確保のための無停電電源容量への影響が懸念される。冷却系および無停電電源への影響については4.2節で検討を行った。また、燃料交換時間の検討ではガス中移送機から使用済燃料プールに燃料を受け渡す際の雰囲気分離方法および必要時間を十分検討していない。ガス中移送機と使用済燃料プールの雰囲気を分離するためには、燃料昇降装置の乾燥が必要となる。今後、雰囲気分離方法および必要時間を評価した上で燃料取扱時間を再評価する必要がある。

表4.1-1 水プール直接貯蔵方式による燃料取扱設備主要仕様

対象			仕様	
炉内燃料移送系	炉内燃料移送方式		切込み付きコラム型炉心上部機構+単回転プラグ+燃料交換機	
	燃料交換機	型式	マニプレータ式	
		アーム長	1690mm	
	炉内中継装置	型式	回転ラック式(単体移送)	
炉外燃料移送系	炉外燃料移送方式		燃料出入機+ガス中移送機+燃料昇降装置	
	燃料出入機	型式	レールレス台車式	
		収納筒数	1基	
		取扱対象	Naポット入り高発熱燃料(22.5kW)	
		取扱体数	1体	
		冷却系統数	空気間接冷却系×2系統	
	ガス中移送機	型式	走行式	
		取扱対象	ガス中裸状態の高発熱燃料(22.5kW)	
		冷却系統数	Arガス直接冷却系×2系統(動的機器は2基/系統)	
	燃料昇降装置	型式	ワイヤロープ巻上式	
		取扱対象	ガス中裸状態の高発熱燃料(22.5kW)	
		取扱体数	1体	
	Naポット	型式	フィンなし単体ポット	
		収納体数	1体	
ポット形状		φ355mm(ハンドリングヘッド部φ395mm)×h4690mm		
燃料貯蔵系	貯蔵方式		水プール直接貯蔵方式	
	水プール	プール本体	型式	ライナー張り縦型貯蔵式
			貯蔵容量	1760体
	冷却浄化系	冷却浄化方式	プール形状	w16.07m×d11.46m×h13.75m
			冷却浄化方式	浄化系先行型、1次冷却水系と2次冷却水系の組み合わせ
			冷却系統数	1系統(循環ポンプ、熱交換器は2基設置)
			除熱容量	5.45MW
	新燃料貯蔵設備		型式	空気中縦型貯蔵式
		貯蔵容量	364体 ¹⁾	
燃料処理系	燃料洗浄		洗浄方式	乾式洗浄(Arガスブロー洗浄)
			洗浄系統数	2系統(燃料出入機の冷却系利用)
			洗浄時ガス温度	300℃(洗浄性能50%)
	破損燃料貯蔵		型式	Naポット貯蔵設備
			基数	6基
			冷却系統数	空気間接冷却系×3系統 ²⁾
	燃料検査		検査方式	X線CT(Naポット入り状態で検査)

注1) 燃料交換4バッチに相当(112体+84体×3)

注2) 具体的な検討は実施していないが、除熱容量によっては、Arガス直接冷却系(Naポット表面冷却)×3系統に変更することもあり得る

表 4.1-2 使用済燃料のピーク線出力

項目	値
検討条件	発熱量 28kW の燃料における燃料ピンのピーク線出力 = 1.4W/cm (2.3 節参照)
① 高発熱燃料 (22.5kW)	発熱量 22.5kW の燃料における燃料ピンのピーク線出力 = $1.4\text{W/cm} \times (22.5\text{kW}/28\text{kW})$ = 1.125W/cm
② 低発熱燃料 (5kW)	発熱量 5kW の燃料における燃料ピンのピーク線出力 = $1.4\text{W/cm} \times (5\text{kW}/28\text{kW})$ = 0.25W/cm

表 4.1-3 使用済燃料の単位長さ熱容量

項目	値
① 燃料ペレット	<ul style="list-style-type: none"> ・ 密度 = $1.09 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$ ・ 比熱 = $3.562 \times 10^{-1} \text{ kJ/kgK}$ ・ 燃料被覆管内径 = 8.98mm ・ ペレットスミア密度 = 82% ・ 体積 = $\pi/4 \times (8.98/1000)^2 \times 0.82 \times 1\text{m} = 5.193 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ ・ 熱容量 = $(1.09 \times 10^4) \times (3.562 \times 10^{-1}) \times (5.193 \times 10^{-5})$ = $2.016 \times 10^{-1} \text{ kJ/K}$
② 燃料被覆管	<ul style="list-style-type: none"> ・ 密度 = $7.692 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ・ 比熱 = $6.089 \times 10^{-1} \text{ kJ/kgK}$ ・ 体積 = $\pi/4 \times \{(10.4/1000)^2 - (8.98/1000)^2\} \times 1\text{m} = 2.161 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ ・ 熱容量 = $(7.692 \times 10^3) \times (6.089 \times 10^{-1}) \times (2.161 \times 10^{-5})$ = $1.012 \times 10^{-1} \text{ kJ/K}$
③ 合計	<ul style="list-style-type: none"> ・ 熱容量合計 = $2.016 \times 10^{-1} + 1.012 \times 10^{-1}$ = $3.029 \times 10^{-1} \text{ kJ/K}$

表 4.1-4 使用済燃料の温度上昇率

項目	値
式	ピーク線出力÷単位長さ熱容量
① 高発熱燃料	$(1.125\text{W/cm} \times 100) \div (3.029 \times 10^{-1} \text{ kJ/K} \times 1000)$ $= 0.371^\circ\text{C/sec}$ $(= 22.3^\circ\text{C/min})$
② 低発熱燃料	$(0.25\text{W/cm} \times 100) \div (3.029 \times 10^{-1} \text{ kJ/K} \times 1000)$ $= 0.0825^\circ\text{C/sec}$ $(= 5.0^\circ\text{C/min})$

表 4.1-5 冷却機能喪失時におけるガス中裸燃料の余裕時間の余裕時間

燃料取扱方式	燃料位置	ガス流量		各部温度		冷却停止後の制限温度 までの時間余裕 ³⁾	
		(ラッパ管内)	(Nm ³ /min)	ガス入口温度 (°C)	ガス出口温度 (°C)		被覆管最高 温度(中央) (°C)
水プール直接貯蔵方式 ¹⁾	ガス中移送機による乾式 洗浄時 ²⁾		10	300	448	402	10
	ガス中移送機による移送		10	150	298	253	17
	燃料昇降装置による移送 時 ³⁾		10	50	198	155	21
EVST貯蔵方式 ¹⁾	燃料出入機による乾式洗 浄時 ²⁾		2.5	350	431	385	49
	燃料出入機による移送時		2.5	150	281	236	80
	燃料昇降装置による移送 時 ³⁾		2.5	50	181	137	100

注1) 水プール直接貯蔵方式では22.5kW、EVST貯蔵方式では5kWの燃料取扱(いずれもアルゴンガス冷却)

注2) ナトリウムポット取扱設備、または、EVST上でのアルゴンガスフローによる乾式洗浄

注3) 短期事象での燃料被覆管制限温度630°Cまでの到達時間。冷却機能喪失時における燃料被覆管温度の上昇率(断熱温度上昇)は、22.5kWで22.3°C/min、5kWで5.0°C/min

表4.1-6 水プール直接貯蔵方式における燃料交換時間検討条件

大項目	項目	単位	値
移送距離	原子炉容器～ナトリウムポット取扱設備	m	38
	炉上部～炉内中継槽	m	25
	ナトリウムポット取扱設備～燃料出入機	m	15
	ナトリウムポット取扱設備～ガス中移送機	m	10
	ガス中移送機～使用済燃料プール	m	10
移送速度	燃料出入機(高速)	m/min	20
	(低速)	m/min	0.6
	グリッパ昇降速度(高速)	m/min	10
	(低速)	m/min	0.6
その他	グリッパ開閉時間	min	0.5
	ドアバルブ開閉時間(ガス置換含む)	min	2
	炉内中継装置回転ラック回転時間	min	1
	回転移送機による移送時間	min	2
	ガス中移送機による移送時間	min	1
	新燃料受入設備ガス置換・予熱時間	min	25

表 4.1-7 燃料洗浄後における必要な冷却時間

単位:°C

番号	ガス入口温度	対象箇所	冷却時間 ¹⁾										
			0秒	50秒	100秒	150秒	200秒	250秒	300秒	350秒			
ケース ²⁾	150°C ³⁾	燃料中心	401.7	328.0	291.8	273.5	264.0	259.5	256.4	255.1			
		燃料下端	447.6	375.1	338.5	319.4	309.3	303.9	301.0	299.4			
ケース ²⁾	50°C	燃料中心	401.7	275.7	216.9	187.5	172.3	164.2	159.9	157.6			
		燃料下端	447.6	322.7	263.0	232.5	216.4	207.8	203.2	200.6			

注1) 灰色は300°C以下の温度領域を示す。

注2) いずれも初期状態では、燃料洗浄を想定して、300°C、10Nm³/minのアルゴンガスにより冷却(燃料被覆管温度は、中心部で401.7°C、下部部で447.6°C)

注3) 150°C、10Nm³/minのアルゴンガスにより冷却

注4) 50°C、10Nm³/minのアルゴンガスにより冷却

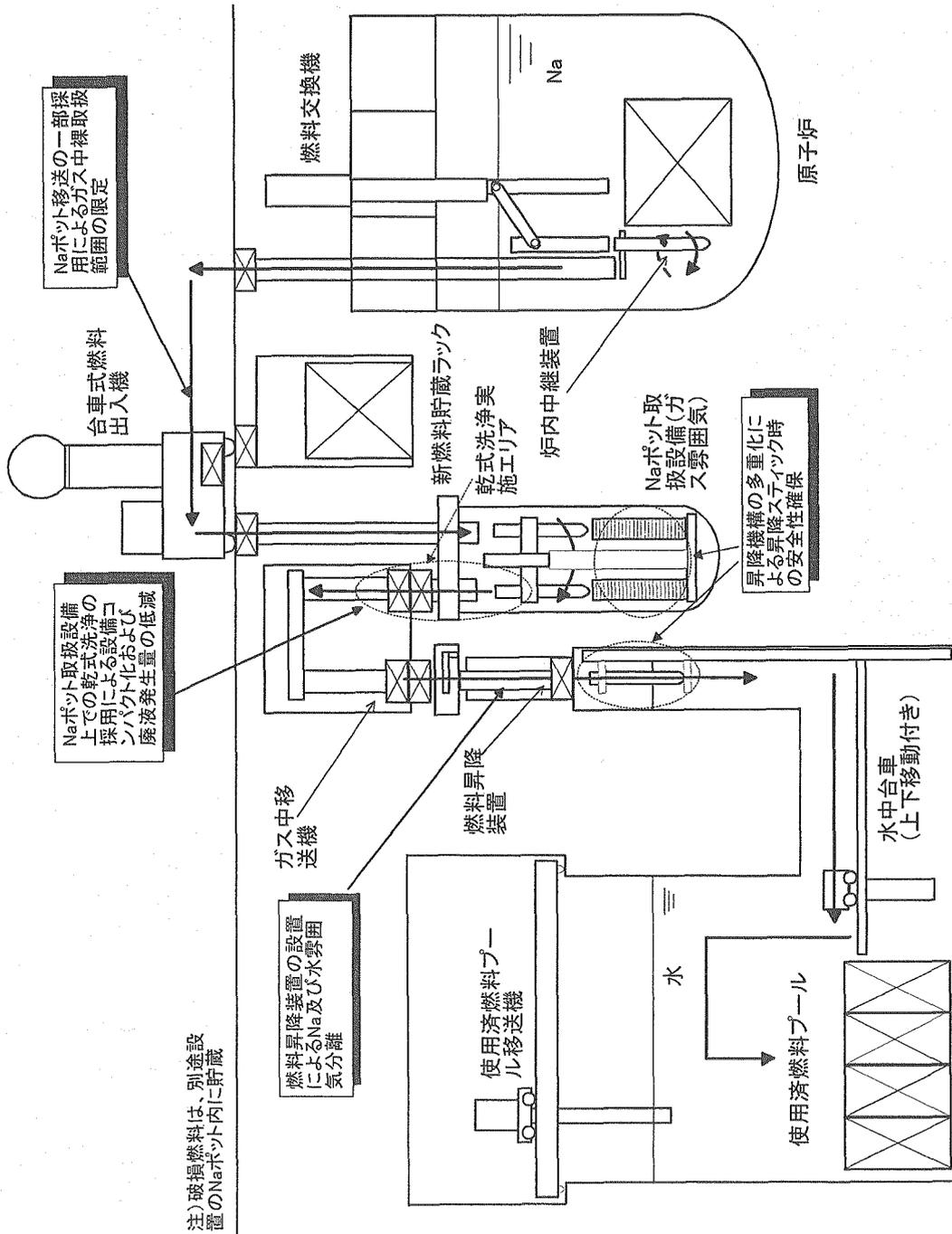


図 4.1-1 水プール直接貯蔵方式の全体構成概念図

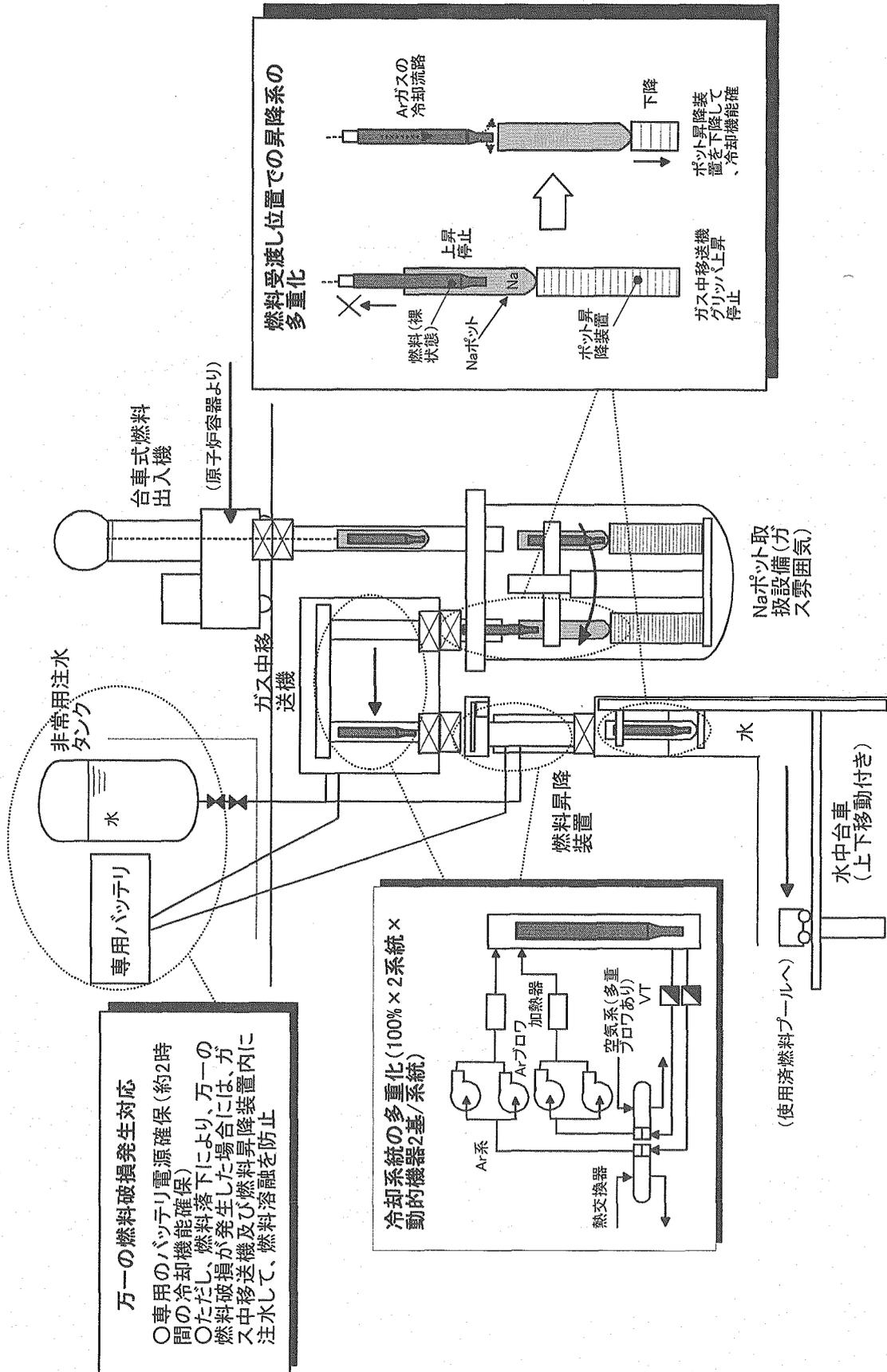


図 4.1-2 水プール直接貯蔵方式の安全対応

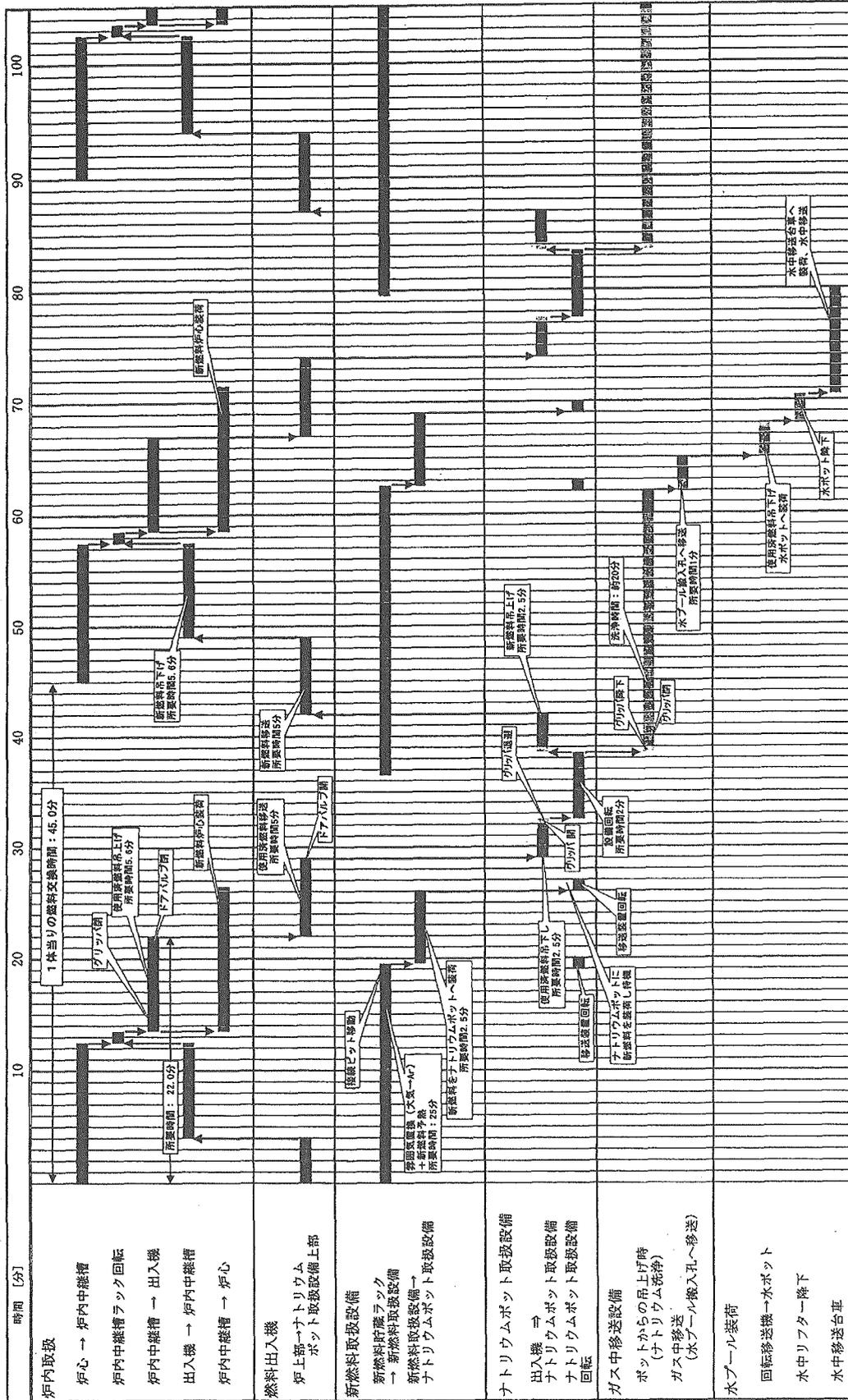


図 4.1-3 水プール直接貯蔵方式の燃料交換スケジュール

4.2 冷却系影響評価

(1) 概要

水プール直接貯蔵方式は高発熱燃料を裸で取扱うため冷却系への負担が増加する。ここでは平成14年度実施された水プール直接貯蔵方式における回転移送機および乾式洗浄設備における冷却系への影響評価をまとめた。

(2) 検討条件

検討対象は平成14年度におけるナトリウム冷却中型炉4モジュールプラントにおける水プール直接貯蔵方式の燃料取扱設備の冷却系とする。全体システム概念図を図4.2-1に示す。検討条件を以下にまとめる。使用済燃料条件等は平成14年度の値を用いている。

・ 集合体型式	: ABLE
・ 燃料要素数	: 271 体
・ 被覆管外径	: 8.5mm
・ 被覆管肉厚	: 0.5mm
・ 配列ピッチ	: 9.81mm
・ 燃料スミア密度	: 82%TD
・ スペーサワイヤ径	: 1.26mm
・ ワイヤ巻付けピッチ	: 200mm
・ 炉心高さ	: 800mm
・ ブランケット高さ	: 上部 400mm / 下部 350mm
・ 燃料要素全長	: 2905mm
・ 崩壊熱量	: 21kW/体
・ 軸方向出力分布	: 図 4.2-2 参照
・ 集合体径方向ピーキング係数	: 1.1
・ 冷却ガス	: アルゴンガス
・ 冷却ガス入口温度	: 50、150℃

(3) 必要流量評価

冷却ガス入口温度 50、150℃に対し被覆管最高温度がそれぞれ 250、350℃の場合について軸方向温度分布を図4.2-3、図4.2-4に示す。冷却ガス入口温度を 50℃（ケース1：冷却系合理化ケース）、150℃（ケース2：EVST燃料出入機と同等）としたときの集合体内部の冷却ガス流量と被覆管外面温度の関係を表4.2-1、図4.2-5に示す。必要冷却ガス流量は以下のように評価された。

	冷却ガス入口温度	被覆管最高温度	必要流量
ケース1	150℃	350℃	7.85 Nm ³ /min
ケース2	50℃	250℃	7.97Nm ³ /min

(4) 回転移送機冷却系検討

平成 14 年度の水プール直接貯蔵方式の検討では裸燃料は回転移送機によって取扱われる。回転移送機の冷却系系統図を図 4.2-6 に示す。回転移送機グリッパにより集合体を保持した状態で上下方向および回転移動を行うため冷却ガスの流路の構成が課題となる。以下では回転移送機に対応した冷却系としてフレキシブルチューブ方式、多段ノズル方式を検討した。

(a) フレキシブルチューブ方式

フレキシブル方式によるガス中移送の概念を図 4.2-7 に、グリッパ概念図を図 4.2-8 に示す。冷却時はアクチュエータロッドを降下して冷却ガスの漏れを防止する構造となっている。このため本評価では無駄流れを無視した。

冷却ガス温度は 50°C の時のフレキシブルチューブ内径と冷却ガス速度の関係を図 4.2-9 に示す。アルゴンガスの音速が 330m/s であることを考慮しマッハ数制限を 0.2 とするとアルゴンガス流速制限は 66m/s と評価される、これに余裕をみて 50m/s を設計上の制限速度とした。このときのフレキシブルチューブ径は 50mm と評価され、これに対応した既存仕様は 65mm となる。このときのフレキシブルチューブの巻数と長さの関係を図 4.2-10 に示す。フレキシブルチューブの長さを 25m とすると、ドラム幅 500mm、直径 800mm 程度で成立する見通しである。

冷却ガスの温度を EVST 方式の場合の燃料出入機と同等の 150°C とするときには必要冷却ガス流量が約 1.6 倍となるため、フレキシブルチューブ径は約 1.3 倍となる。また、本評価では無駄流れを無視しているが、実際はグリッパ部分の無駄流れを完全に排除するのは困難であり、必要冷却ガス流量はさらに増大する可能性がある。この場合フレキシブルチューブ径および巻取りに必要な半径が増加し設備物量が増加する可能性がある。

(b) 多段ノズル方式

多段ノズル方式の場合の回転移送機概念図を図 4.2-11 に示す。多段ノズル方式ではフレキシブルチューブと比較すると冷却ガス流路断面積を大きくできるために、冷却ガス流速を低下できる可能性を有している。ただし、伸縮部の信頼性および気密性に課題があると考えられる。

(5) 乾式洗浄設備冷却系検討

平成 14 年度の水プール直接貯蔵方式では固定式の乾式洗浄設備を設置していた。乾式洗浄設備の冷却系系統図を図 4.2-12 に示す。ここでは乾式洗浄設備に対応した冷却設備として案内管方式による冷却系を検討した。冷却ガス流路の概念図を図 4.2-13 に示す。集合体支持部は球面座等を用い可能な限り気密性を確保する構造としている。このとき集合体外部を流れる無駄流れを評価した。検討条件を以下に示す。

- ・案内管内径 : 210mm
- ・案内管軸長 : 4000mm

- ・ 集合体支持部開孔率 : パラメータ
- ・ 燃料要素バンドル部圧力損失評価式 : Rehme の式
- ・ 無駄流れ圧力損失係数 : $16.7Re^{-0.167}$

無駄流れと集合体支持部開孔率の関係を図 4.2-14 に示す。冷却ガス入口温度を 150℃とすると開孔率 0.1 において必要流量の 1.8 倍の 14.1Nm³/min、開孔率 0.2 倍において 2.5 倍の 19.63Nm³/min が必要である。ただし、乾式洗浄試験の結果から洗浄性能 50%を確保するためには冷却ガス入口温度を 300℃以上にする必要があるため、冷却ガス入口温度を高温度化した場合の冷却ガス流量評価を今後行う必要がある。

(6) まとめ

水プール直接貯蔵方式を採用した場合、高発熱燃料を取扱うため冷却系への負担が増加する。冷却ガス入口温度を 50、150℃とした場合は必要な冷却ガス流量は 7.85 Nm³/min、7.97 Nm³/min と評価された。冷却ガス流量が増加した場合、集合体内部の圧力損失によって無駄流れが増加する傾向があるため、回転移送機および乾式洗浄設備において無駄流れを抑制する構造の検討を行った。回転移送機ではフレキシブルチューブ方式により冷却ガス注入口を集合体上部に押し付けることにより無駄流れを低減する構造を検討した。フレキシブルチューブ内部の冷却ガス流速は無駄流れを無視しても 50m/s 程度と速く、無駄流れを考慮した場合はフレキシブルチューブ径の増加が懸念され、今後、無駄流れ抑制構造を具体化して無駄流れを考慮した検討が必要であると考えられる。乾式洗浄設備では案内管方式を採用したこの場合の集合体支持部に球面座を用い無駄流れを抑制しているが、開孔率 0.1 において必要流量の 1.8 倍、開孔率 0.2 倍において 2.5 倍の冷却ガスが必要であると評価された。

表 4.2-1 水プール直接貯蔵における冷却ガス必要流量

集合体発熱量 [kW]	冷却ガス 入口温度 [°C]	被覆管外面 温度 [°C]	必要流量	
			kg/s	m ³ [normal]/min
21	50	250	0.237	7.97
		300	0.186	6.25
		350	0.150	5.06
		400	0.125	4.22
		450	0.108	3.64
		500	0.097	3.25
	150	250	0.373	12.56
		300	0.293	9.89
		350	0.233	7.85
		400	0.184	6.20
		450	0.149	5.03
		500	0.125	4.20

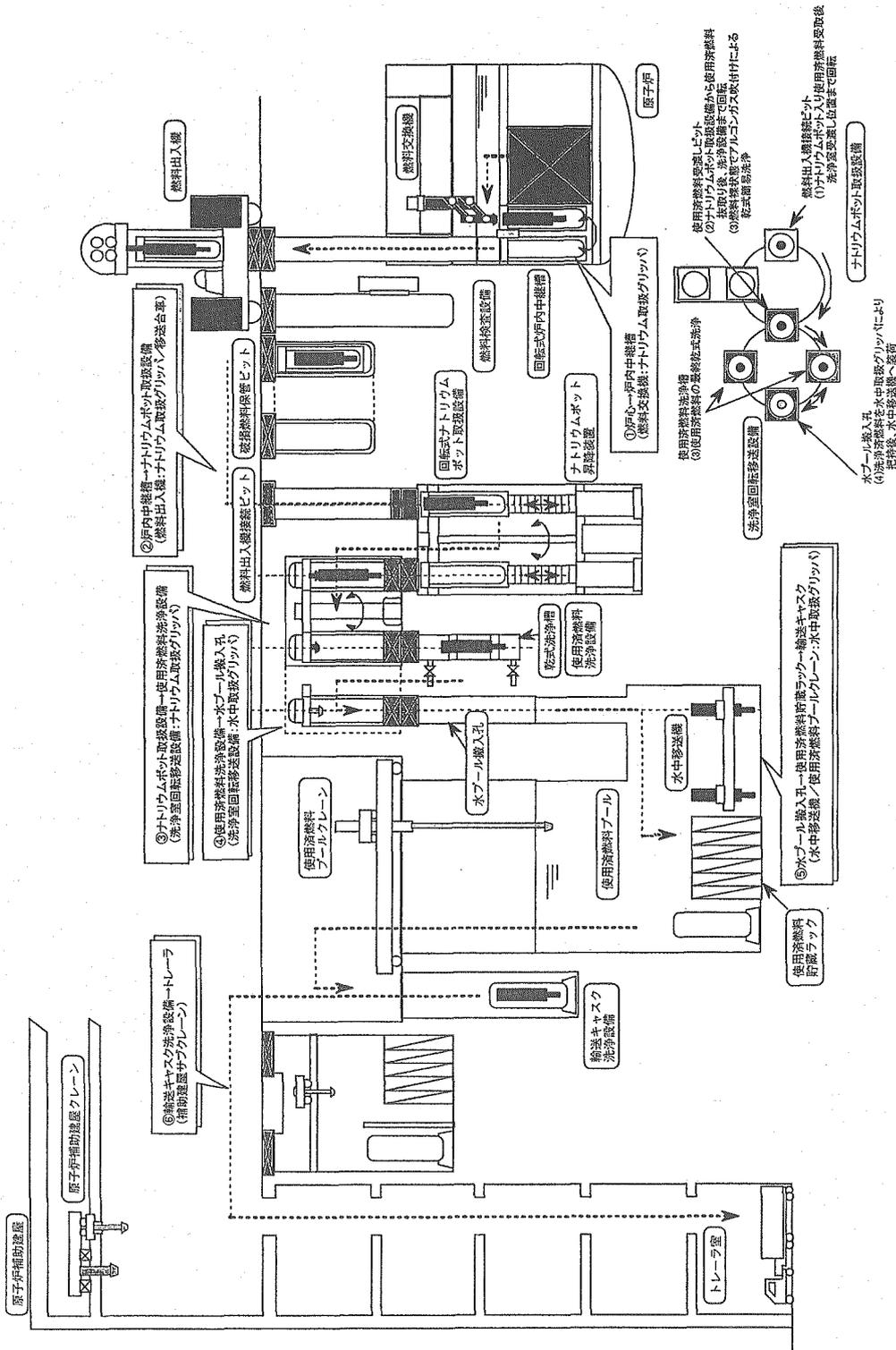


図 4.2-1 水プール直接貯蔵方式全体システム概念図 (平成 14 年度)

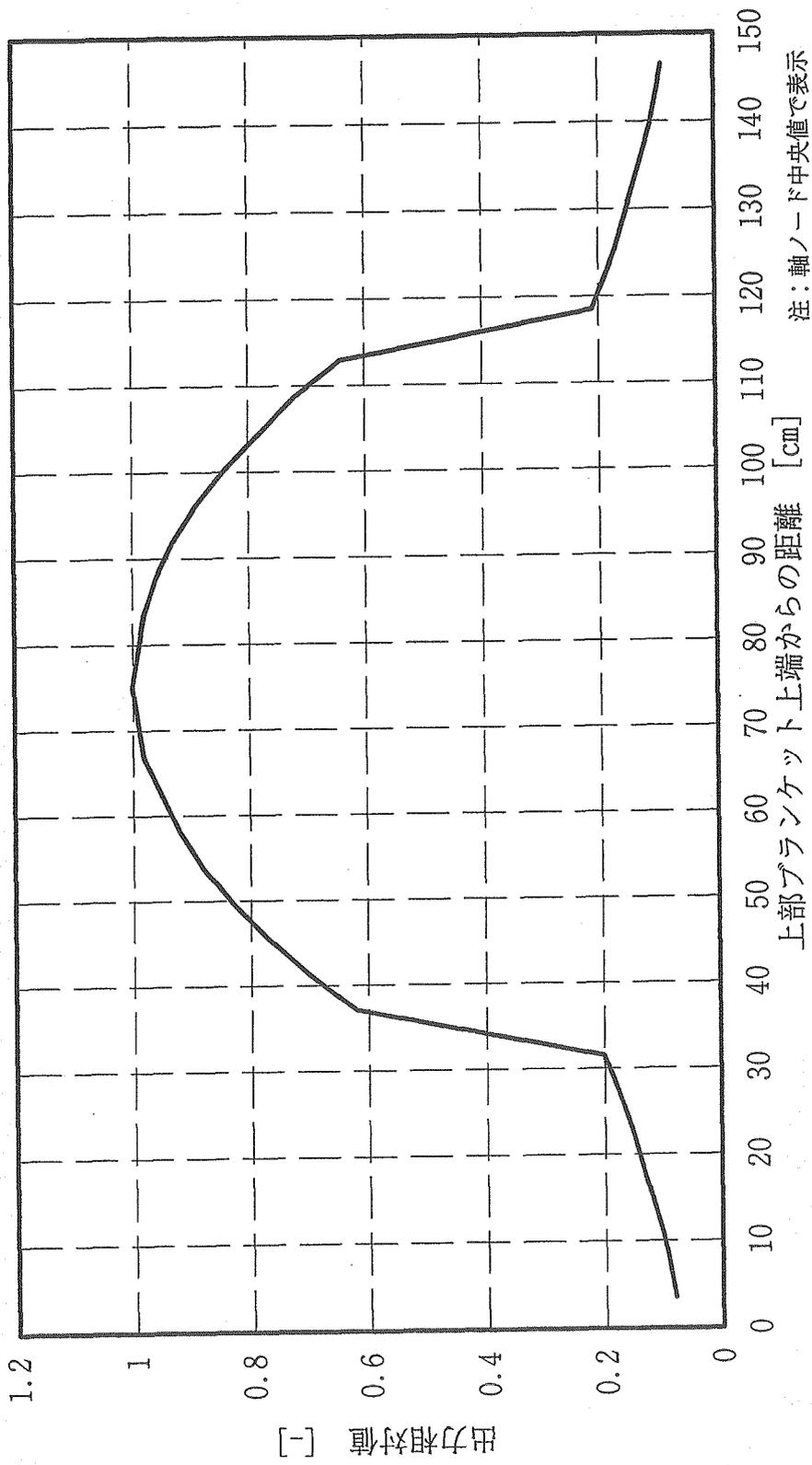


図 4. 2-2 集合体軸方向発熱分布 (平成 14 年度)

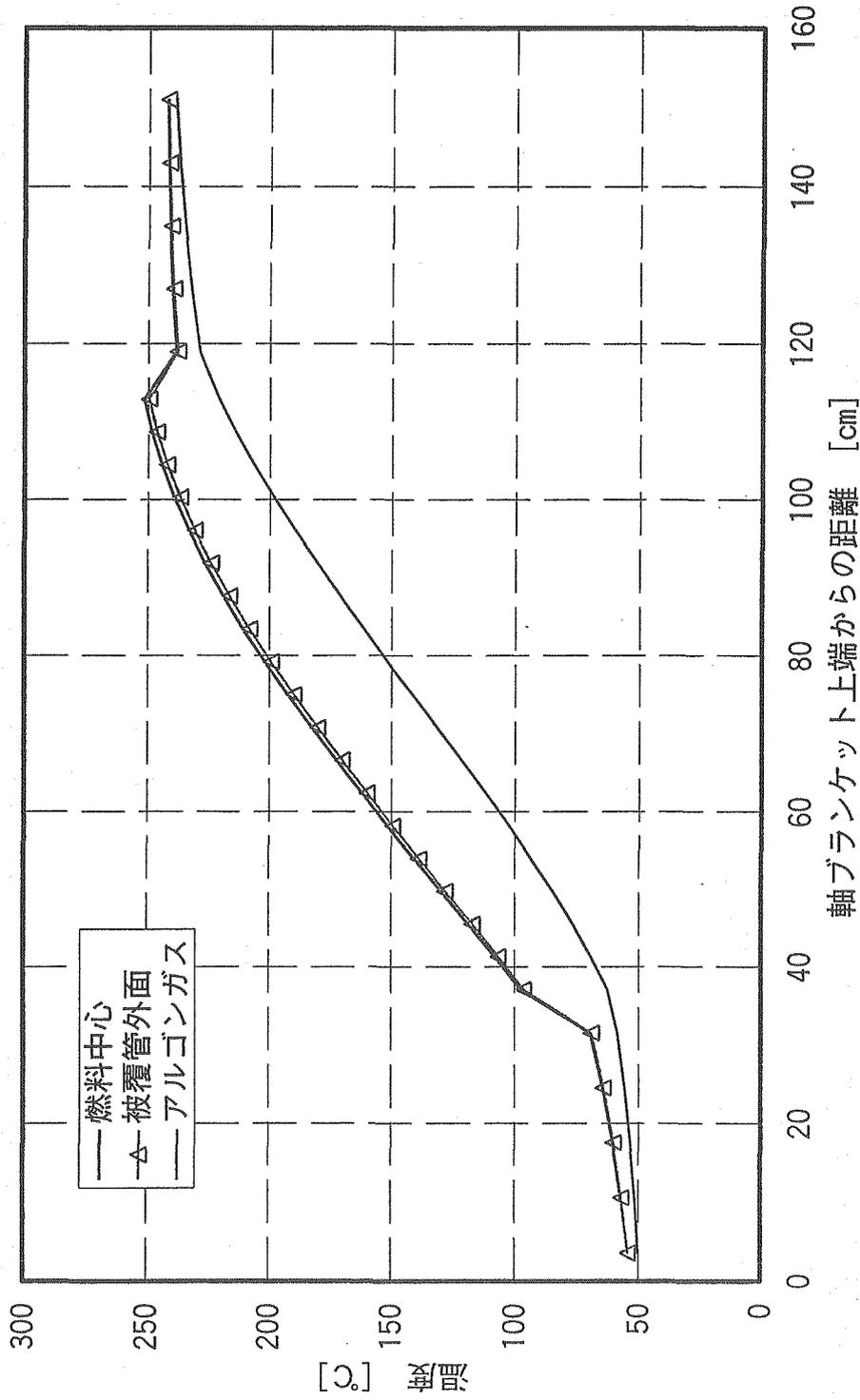


図 4.2-3 水プール直接貯蔵方式の燃料軸方向温度分布 (冷却ガス温度 50°C)

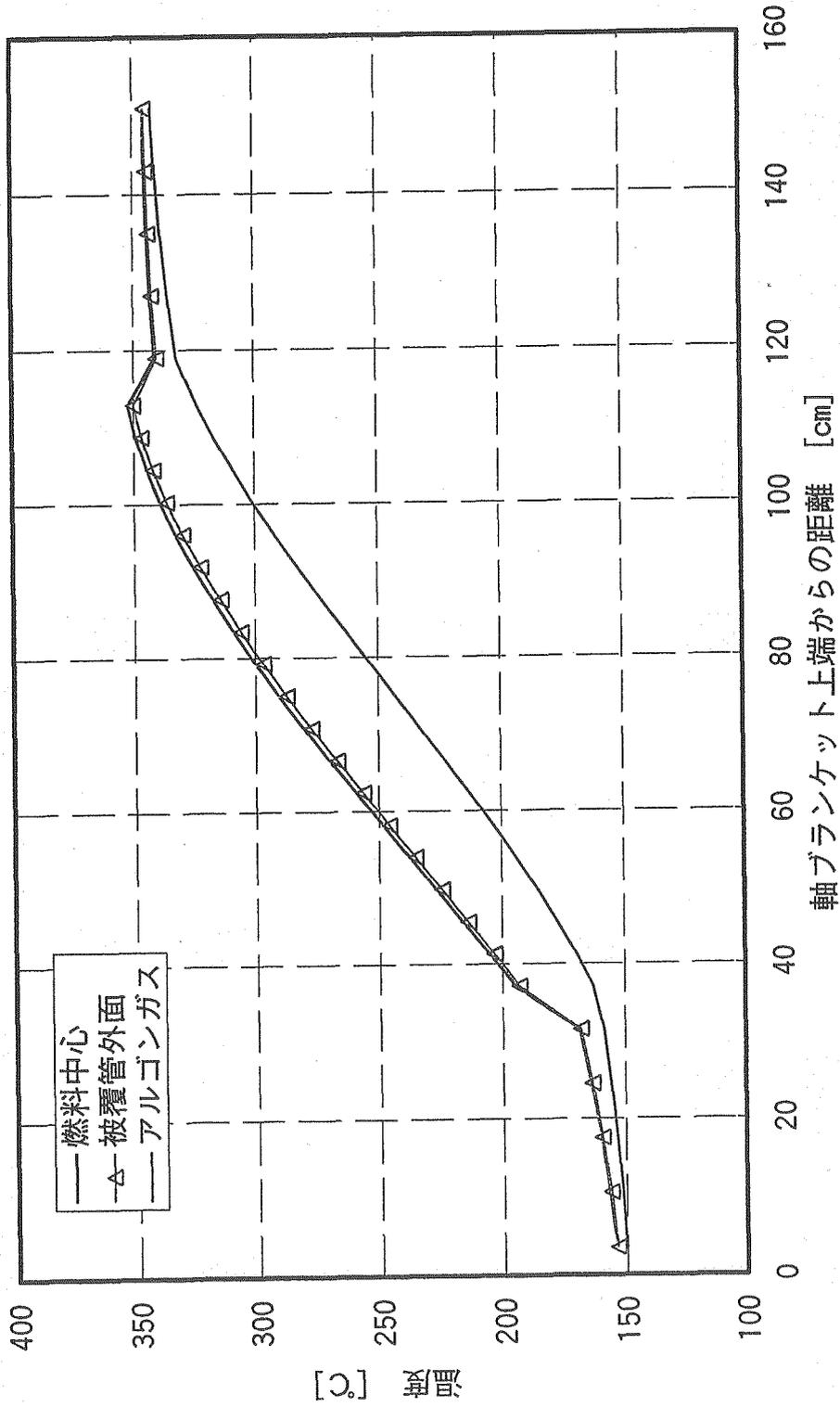


図 4.2-4 水プール直接貯蔵方式の燃料軸方向温度分布 (冷却ガス温度 150°C)

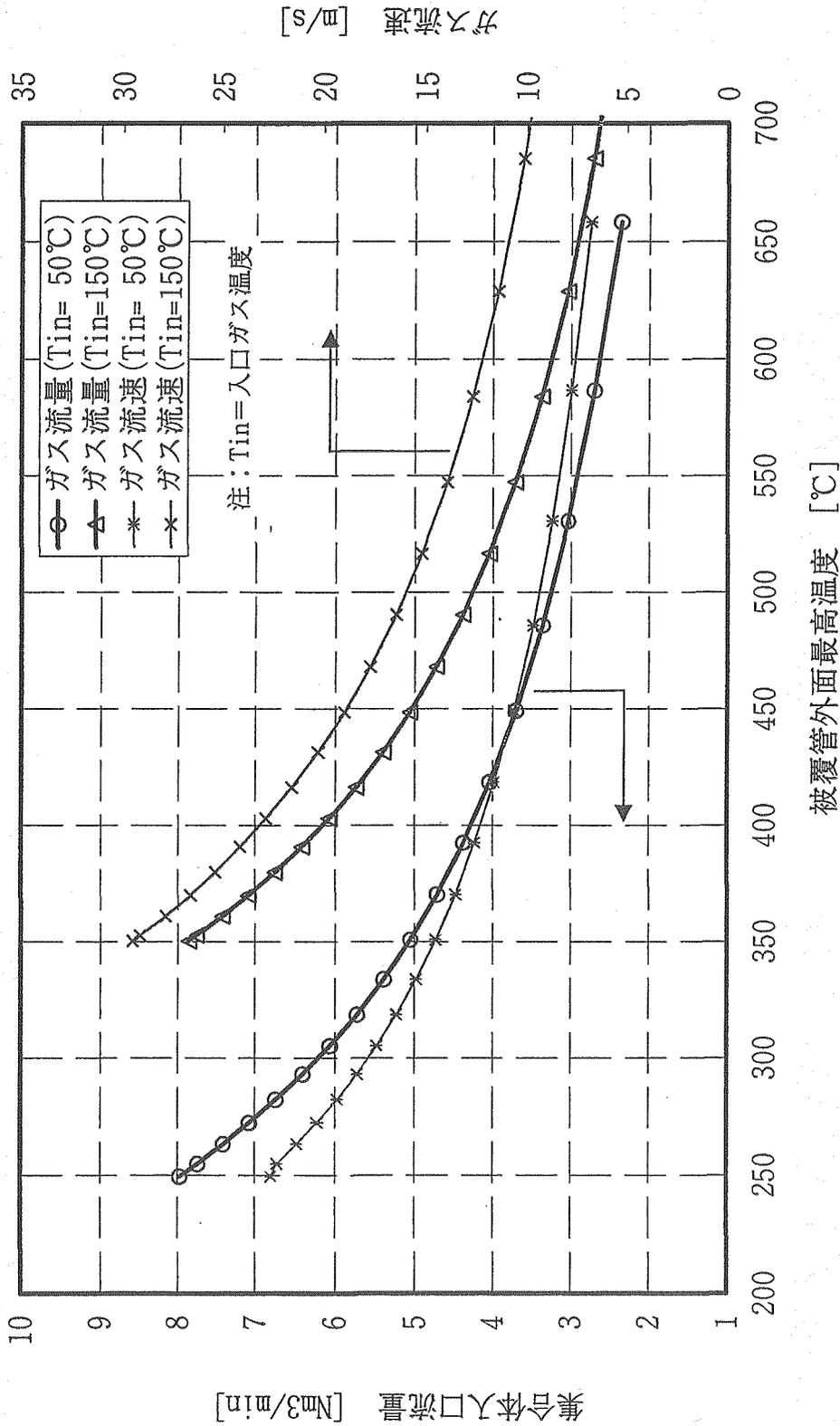


図 4.2-5 水プール直接貯蔵方式の被覆管最高温度と冷却ガス流量の関係

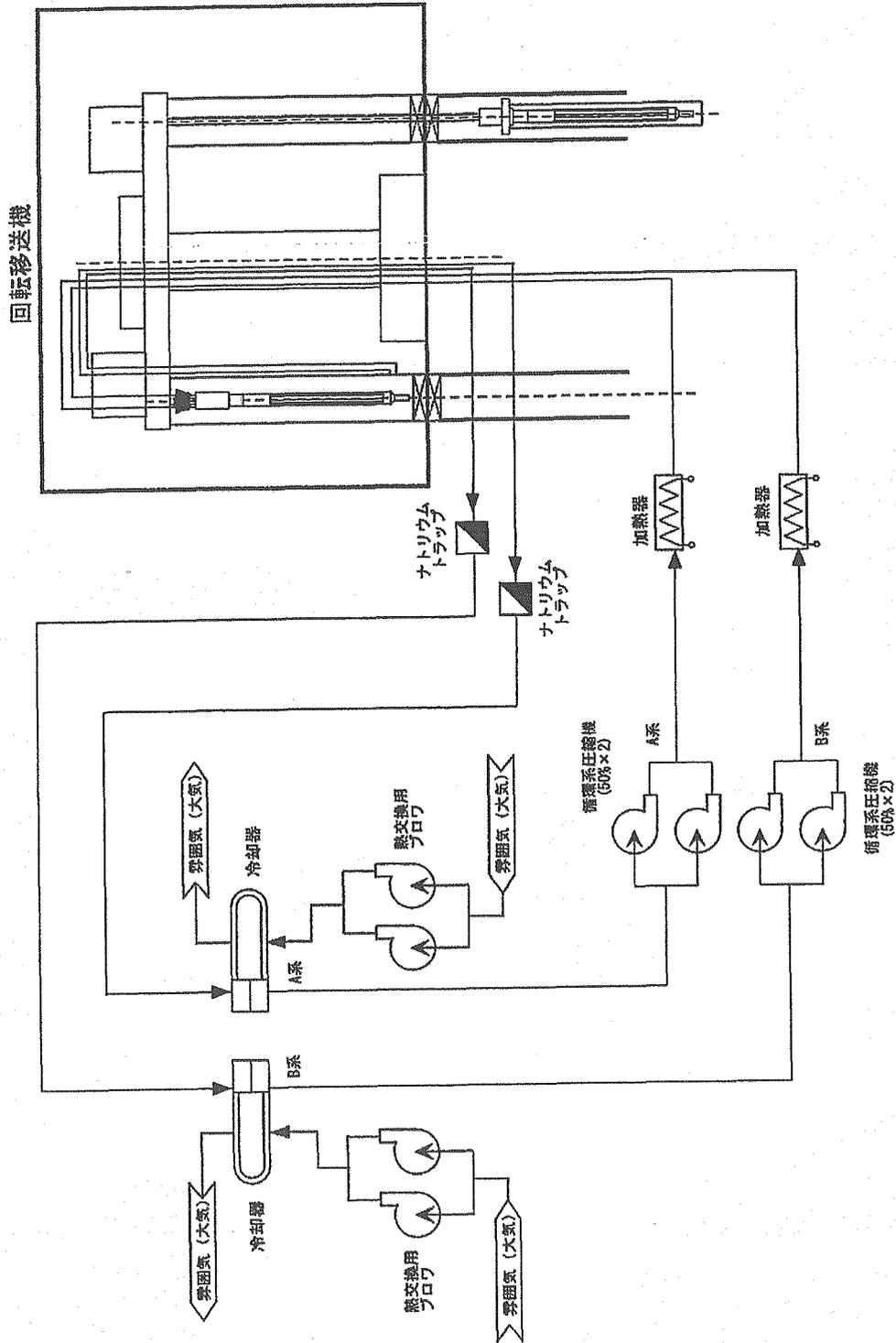


図 4.2-6 回転移送機冷却系統図

回転移送機

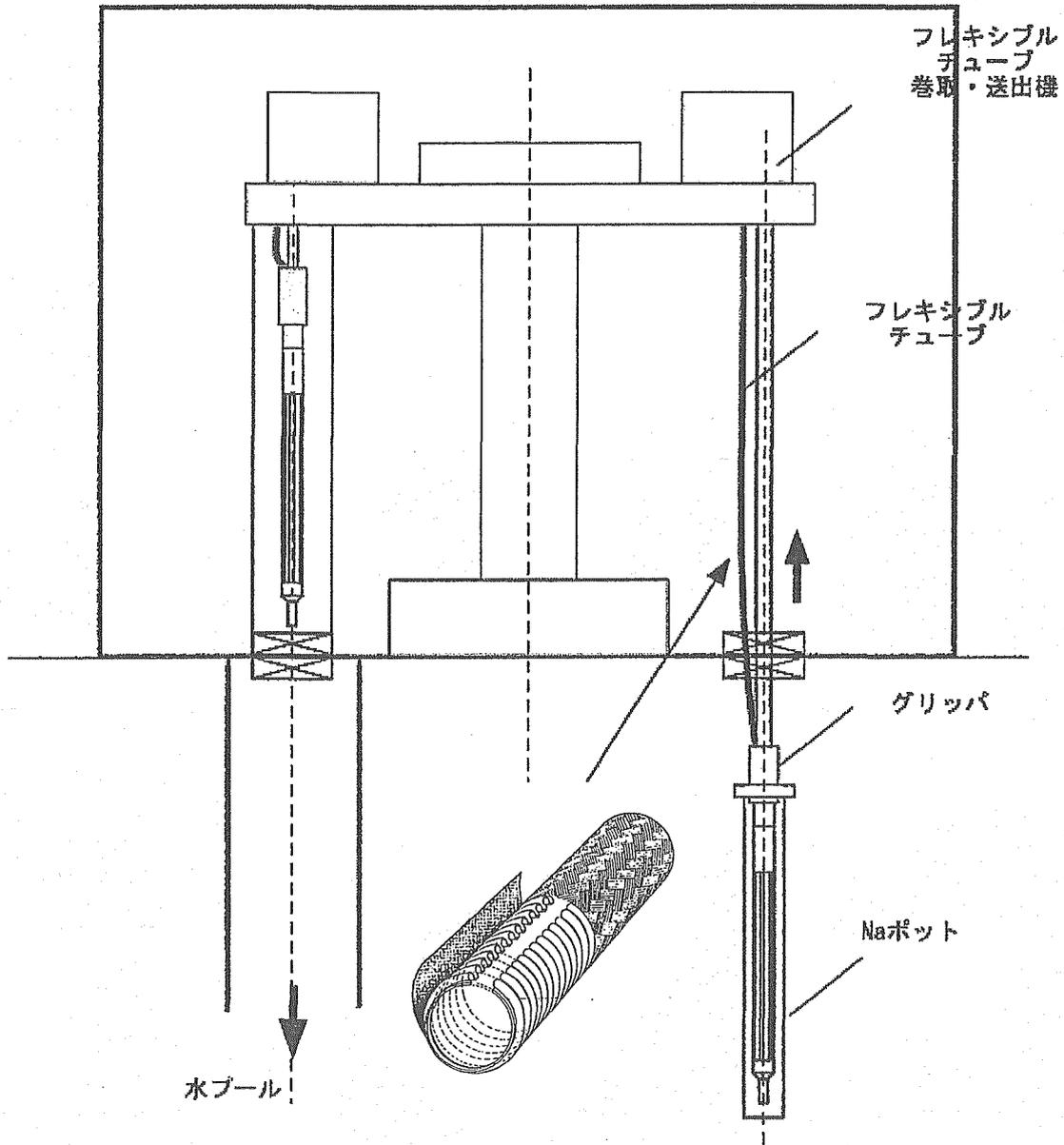


図 4.2-7 フレキシブルチューブによる回転移送機概念図

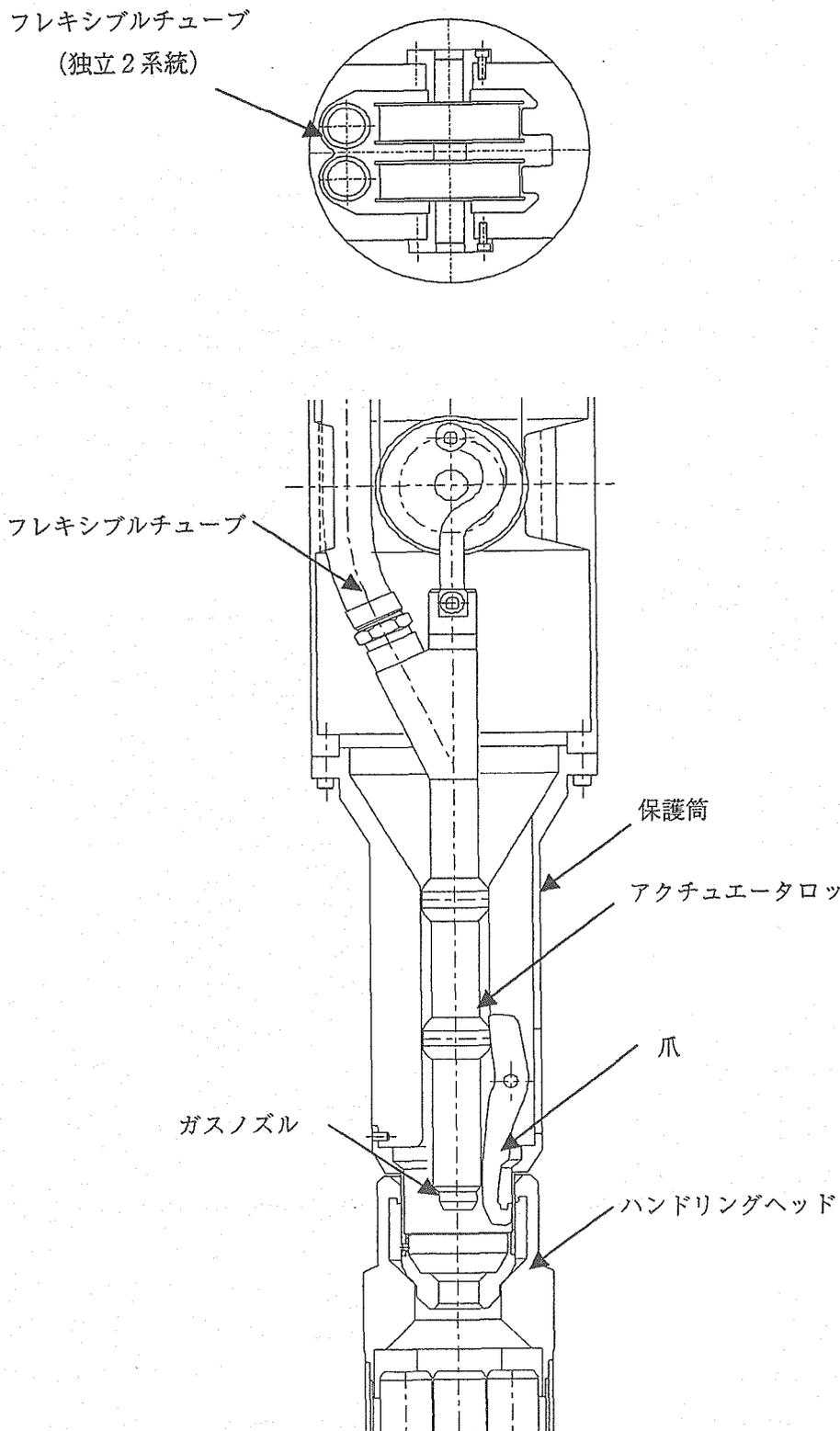


図 4.2-8 (1/2) 回転移送機グリッパ概念図

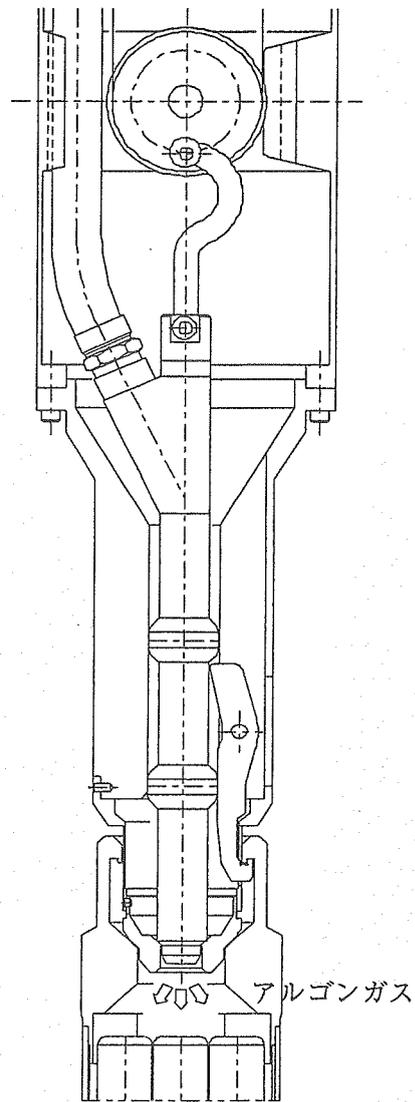


図 4.2-8 (2/2) 回転移送機グリッパ概念図 (冷却時)

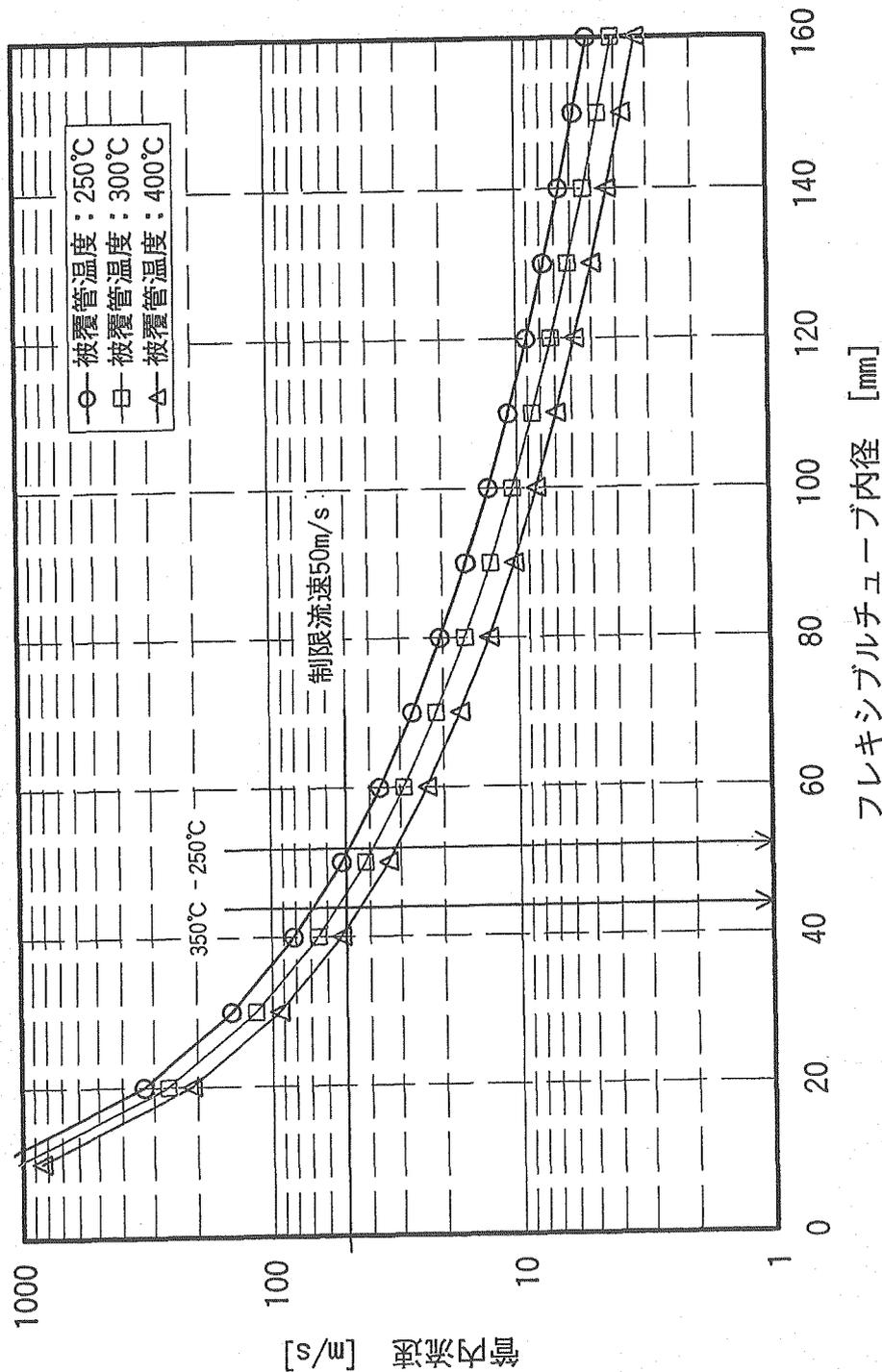


図 4.2-9 フレキシブルチューブ径と冷却ガス流速の関係

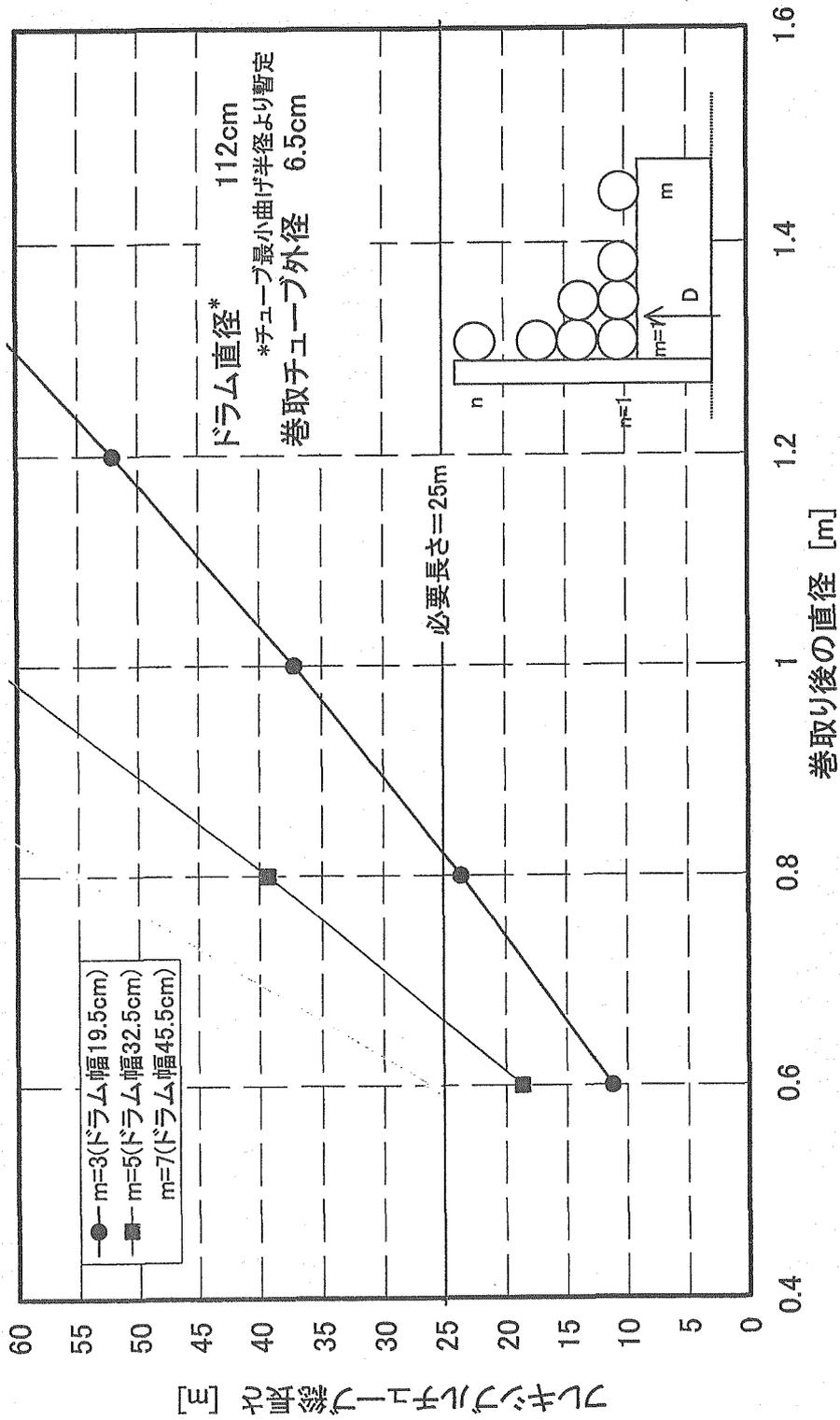


図 4.2-10 フレキシブルチューブの巻取り径と長さの関係

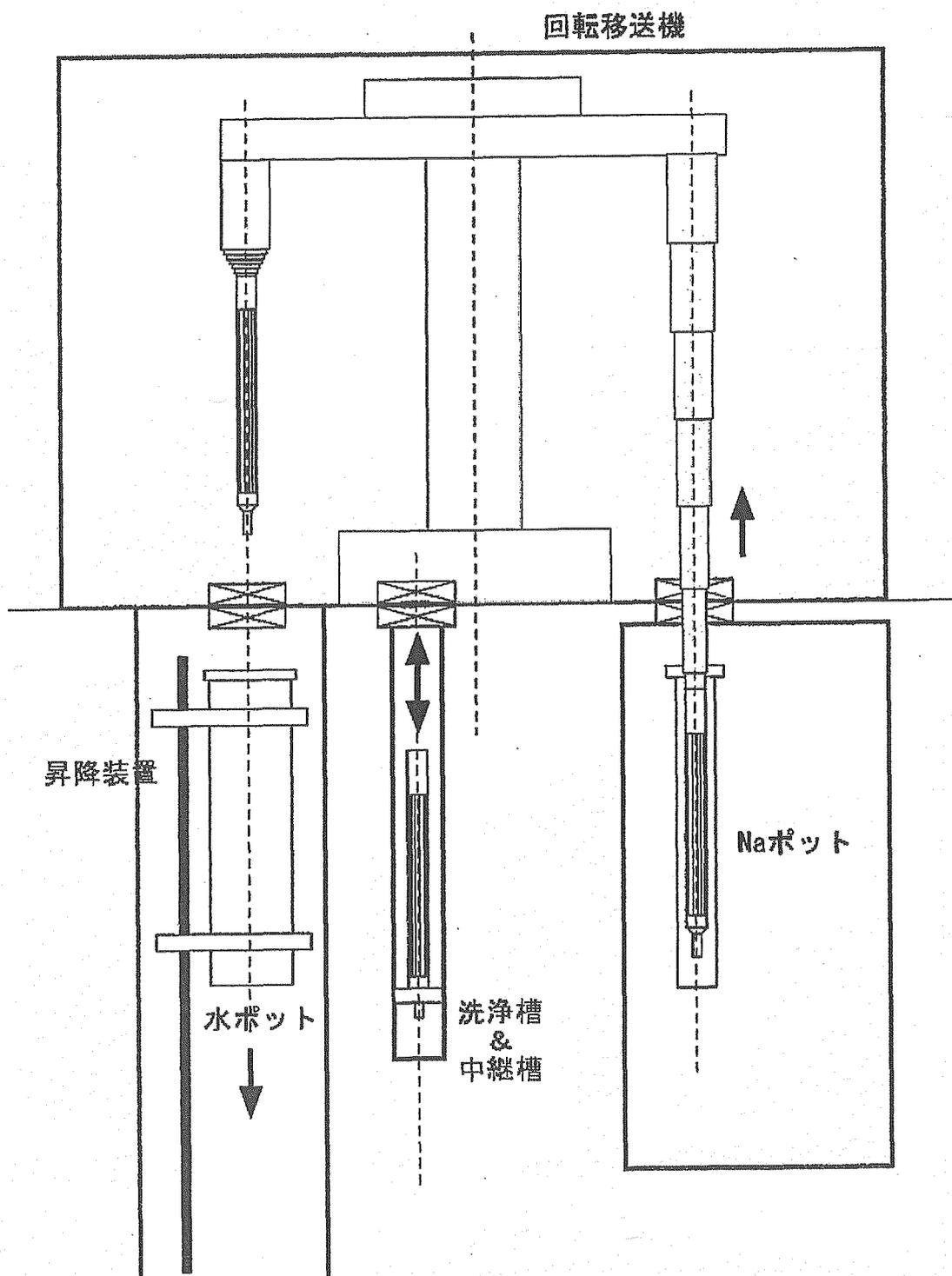


図 4.2-11 多段ノズル方式の回転移送機概念図

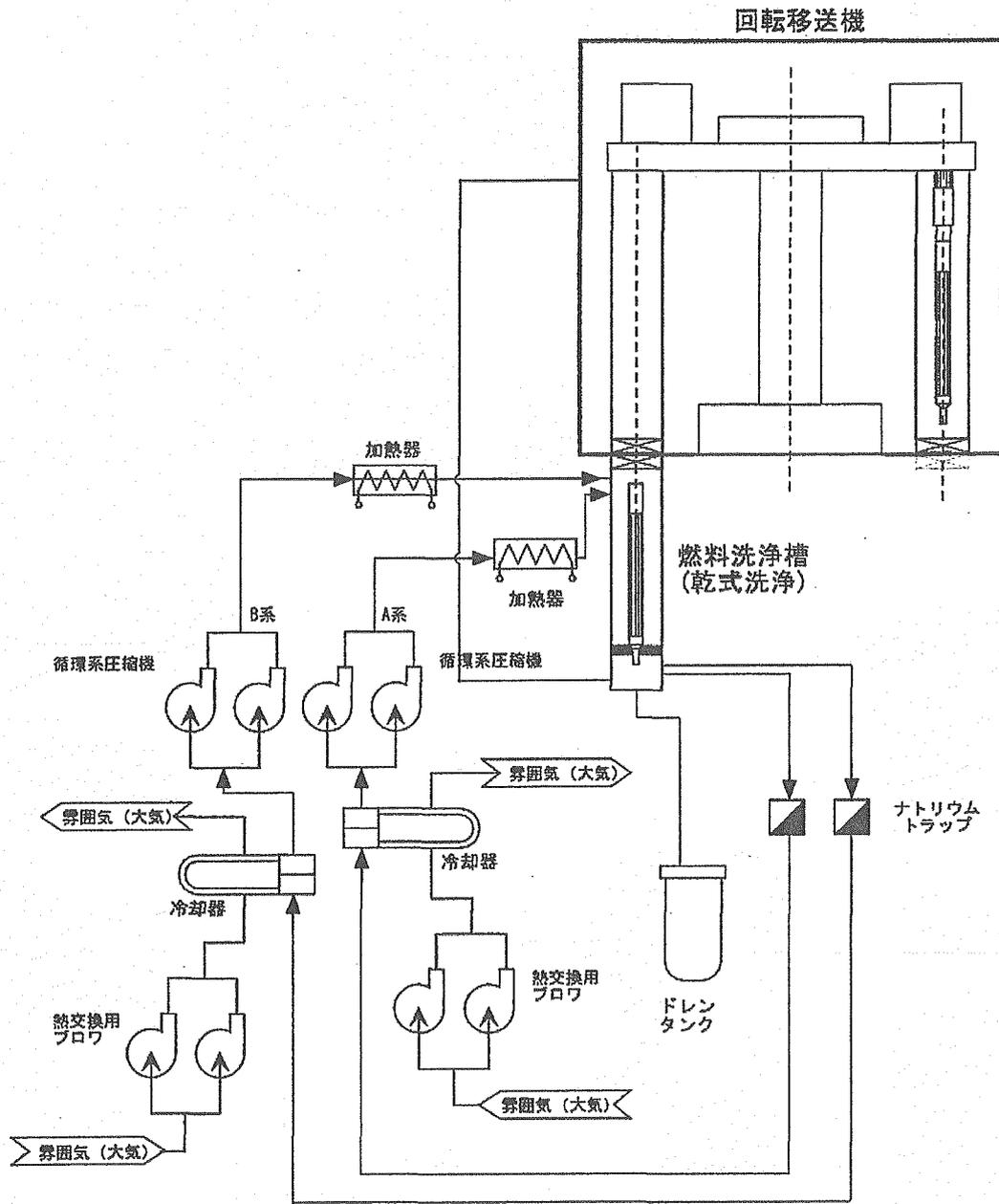


図 4.2-12 水プール直接貯蔵方式の乾式洗浄冷却系系統図

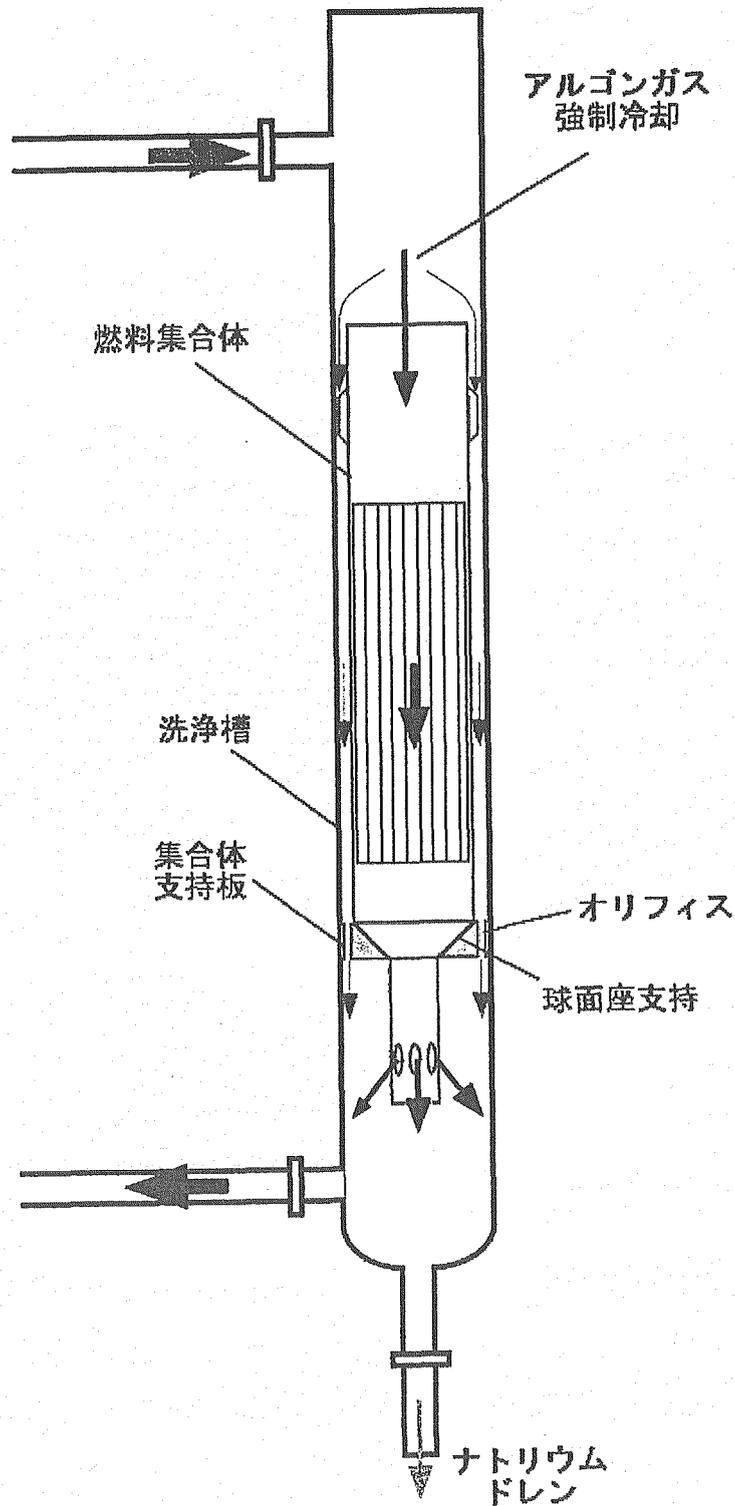


図 4.2-13 案内管方式による乾式洗浄

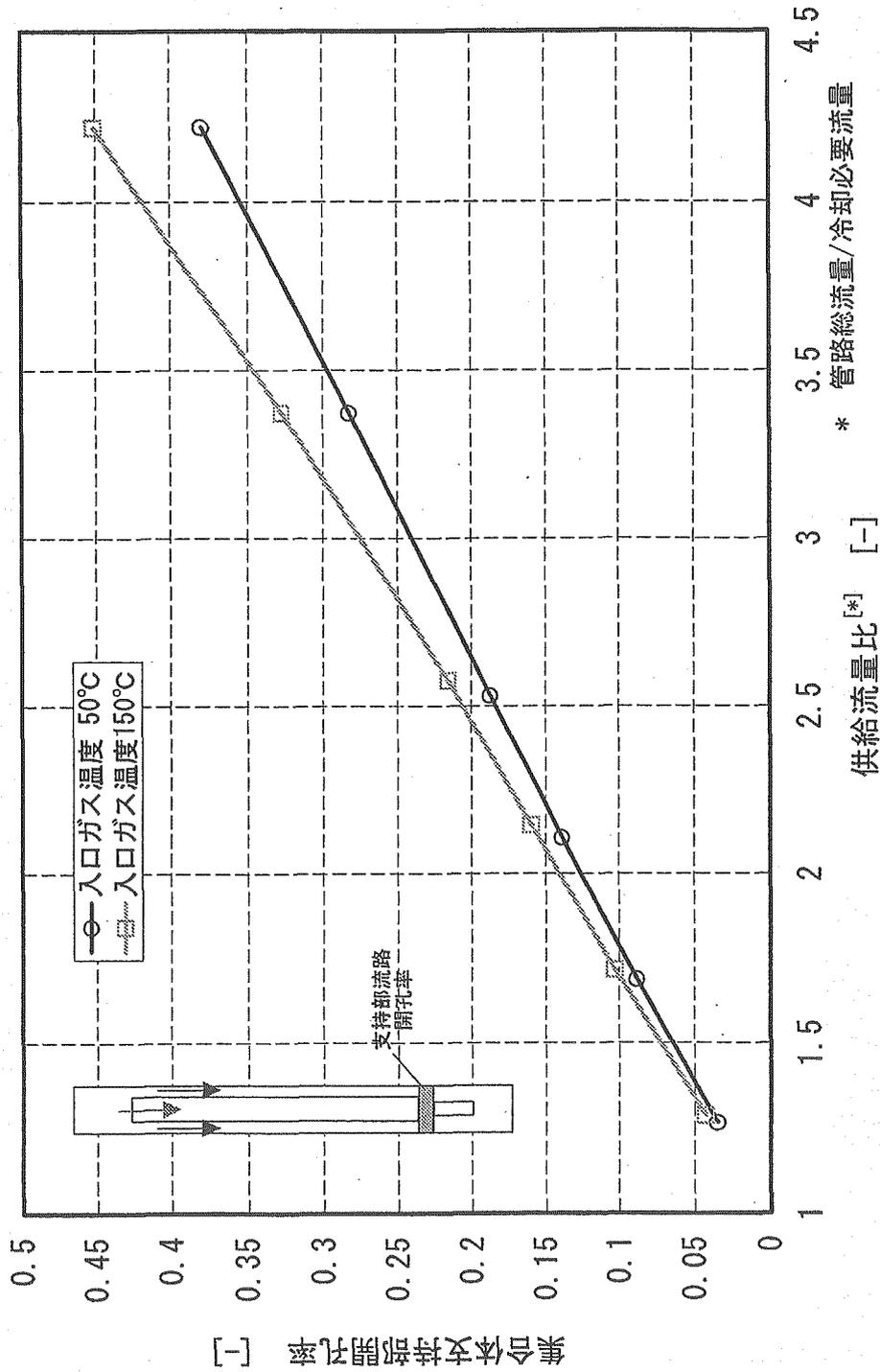


図 4.2-14 案内管方式の場合の冷却ガス無駄流れ評価

4.3 電源系影響評価

(1) 概要

水プール直接貯蔵方式においては高発熱燃料を裸で取扱うため燃料移送中は常に強制冷却を確保する必要がある。このため外部電源喪失時にも冷却が維持されるための対策が必要である。以下では平成 14 年度におこなわれた外部電源喪失時における冷却系維持のための対策検討をまとめた。また、上記の検討をもとに平成 15 年度仕様において水プール直接貯蔵方式と EVST 方式の無停電電源仕様を比較した。

(2) 検討条件

検討対象は平成 14 年度に検討したナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントに適合した水プール直接貯蔵方式による燃料取扱設備とする。検討条件を以下に示す。

- ・ 想定事象 : 全交流電源喪失 (外部電源喪失 + 非常用電源起動失敗)
- ・ 想定時間 : 30 分 (PWR における想定時間文献[10])
120 分 (想定外事象)
- ・ 回転移送機条件
 - 冷却方式 : フレキシブルチューブ方式
 - 系統構成 : 100%×2 系統
 - 冷却ガス入口温度 : 50℃ (水浸漬時)、150℃ (ナトリウムポット取出時)
 - 被覆管温度 : 250℃ (水浸漬時)、350℃ (ナトリウムポット取出時)
- ・ 乾式洗浄設備
 - 冷却方式 : 案内管方式
 - 系統構成 : 100%×2 系統
 - 冷却ガス入口温度 : 150℃
 - 被覆管温度 : 350℃

(3) 電源容量評価

(a) 回転移送機

回転移送機の冷却系系統図を図 4.2-6 に、冷却系設備構成を以下に示す。

- ・ 循環系圧縮機 : 4 基
- ・ 循環系加熱器 : 2 基
- ・ 空気冷却器 : 2 基
- ・ 空気冷却器用ブロウ : 4 基
- ・ ナトリウムトラップ : 2 基

回転移送機内部の冷却系配管は、回転移送機中心部の回転継手を介して冷却器と接続する。回転移送機の運転条件である冷却ガス温度 50℃ (被覆管温度 250℃)、150℃ (被覆管温度 350℃) の場合の圧力損失評価を表 4.3-1、表 4.3-2 に示す。ブロウ圧力条件を以下に

まとめる。

・冷却ガス温度	: 50℃	150℃
・被覆管温度	: 250℃	350℃
・ブロワ吸込絶対圧	: 0.0624MPa	0.0596MPa
・ブロワ吐出絶対圧	: 0.3063MPa	0.3258MPa
・ブロワ圧力比	: 4.91	5.46

圧力比が 2 倍以上のためガス循環器としては圧縮機を採用する必要がある。圧縮機の機動力は JIS B8341 の評価式から冷却ガス 50、150℃それぞれ 47.3、50.9kW となり、圧縮機冷却系電源容量を含めると 50、54kW と評価される。圧縮機を各系統 2 基の構成とすると 1 基当たりの容量は冷却ガス温度 150℃の時を基準として 27kW とする。

(b) 乾式洗浄設備

乾式洗浄設備の冷却系系統図を図 4.2-12 に、冷却系設備構成を以下に示す。

・循環系圧縮機	: 4 基
・循環系加熱器	: 2 基
・空気冷却器	: 2 基
・空気冷却器用ブロワ	: 4 基
・ナトリウムトラップ	: 2 基

乾式洗浄設備は案内管方式を採用しているため、4.2 節で検討したように集合体支持部の開孔率により無駄流れ流量が変化する。ここでは開孔率を 0.06 程度として冷却に必要な流量の 1.5 倍の流量を冷却系循環流量とした。乾式洗浄設備の運転条件である冷却ガス温度 150℃、被覆管制限温度 350℃の条件における系統圧力損失評価を表 4.3-3 に示す。ブロワ圧力条件を以下にまとめる。

・ブロワ吸込絶対圧	: 0.0818MPa
・ブロワ吐出絶対圧	: 0.2373MPa
・ブロワ圧力比	: 4.91

圧力比が 2 倍以上のためガス循環器としては圧縮機を採用する必要がある。圧縮機の機動力は JIS B8341 の評価式から 41.7kW となり、圧縮機冷却系電源容量を含めると 44kW と評価される。圧縮機を各系統 2 基の構成とすると 1 基当たりの容量は 22kW となる。

(4) 無停電電源容量評価

交流無停電電源装置は入出力変圧器、コンバータ、インバータ、蓄電池から構成され通常時は所内交流電源から受電し、コンバータで交流を直流に変換して蓄電池に充電しながら、インバータで直流を交流に変換して給電し、外部電源喪失時には蓄電池からの直流電源をインバータで交流に変換して給電する装置である。独立 2 系統として給電時間は 30 分とするが、想定外事象を考慮して最大 120 分とする。単線結線図を図 4.3-1 に、交流無停電電源装置外観図を図 4.3-2、蓄電池外観図を図 4.3-3 に示す。想定した運転モードを表 4.3-4、

無停電電源装置負荷容量を表 4.3-5、交流無停電電源装置および蓄電池使用を表 4.3-6 に示す。30 分、120 分給電の場合それぞれ蓄電池容量は 600、1500hA、配置面積は 2m×5m×2 基、2m×10m×2 基となった。

(5) 平成 15 年度仕様における比較評価

上記の検討をもとに平成 15 年度仕様において水プール直接貯蔵方式と EVST 方式の無停電電源容量を比較したものを表 4.3-7 に示す。無停電電源の容量は水プール直接貯蔵方式において 500kVA、3000hA、EVST 方式では 60kVA、180hA と評価された。平成 15 年度評価では水プール直接貯蔵方式において破損燃料貯蔵のためのナトリウムポット取扱設備の電源を加算したため無停電電源への負荷が増大している。

(6) まとめ

平成 14 年度の水プール直接貯蔵方式の冷却系電源および無停電電源容量の検討をまとめ平成 15 年度仕様において無停電電源仕様を概略評価した。電源容量は 3000hA と EVST 方式の 180hA より大幅に増加し、蓄電池配置面積は 4m×10m×2 基と大きいが対応は可能であると考えられる。

表 4.3-4 燃料取扱設備冷却系の運転モード

機 器 名	設置 台数	定格出力 (kW/基)	運転モード				備 考
			通常時 (外電)	B0時 (CTG)	SB0 (蓄電 池)	復旧後 (外電)	
回 転 移 送 機	循環系圧縮機	4	27	○	○	○	① 圧縮機定格出力は集合体1体を冷却するのに必要な容量 ② 直接冷却設備は独立2系統(動的機器 50%×2基×2系統) で運用 ③ 燃料集合体2体を同時に取扱う工程があるので2セット 必要
	空気冷却用ブロワ	4	15	○	○	○	除熱後のガス冷却用で循環系と同数
	アルゴンガス加熱器	2	15	○	○	×	ガス出口温度を150℃で想定
洗 浄 槽 設 備	循環系圧縮機	2	22	○	○	○	① 縮機定格出力は集合体1体を冷却するのに必要な容量 ② 直接冷却設備は独立2系統(動的機器 50%×2基×2系統) で運用
	空気冷却用ブロワ	2	15	○	○	○	除熱後のガス冷却用で循環系と同数
	アルゴンガス加熱器	2	15	○	○	×	ガス出口温度を150℃で想定
機 械 系	グリッパ昇降系機器	2	15	○	○	×	ナトリウム雰囲気用/水雰囲気用2系統
	回転移送機駆動系機器	1	15	○	○	×	

表 4.3-5 無停電電源設備負荷容量

負荷名称	定格出力 [kW]	負荷率	効率	力率	所要 入力 [kVA]	設置 台数	A系 交流無停電 電源装置	B系 交流無停電 電源装置
(回転移送機冷却設備)								
循環系圧縮機	27	0.95	0.95	0.90	30	4	2	2
空気冷却用ブロワ	15	0.95	0.95	0.90	16.7	4	2	2
アルゴンガス加熱器	15	1.00	1.00	1.00	15	2	1	1
(ナトリウム洗浄設備の冷却設備)								
循環系圧縮機	22	0.95	0.95	0.90	24.4	4	2	2
空気冷却用ブロワ	15	0.95	0.95	0.90	16.7	4	2	2
アルゴンガス加熱器	15	1.00	1.00	1.00	15	2	1	1
(燃料集合体取扱設備)								
グリッパ昇降系機器	15	0.70	0.95	0.90	12.3	2	1	1
回転移送機駆動系機器	15	0.70	0.95	0.90	12.3	1	0	1
合計[kVA]							217.9	230.2
余裕(5%)込み容量(kVA)							229	242

表 4.3-6 無停電電源設備仕様

		30分給電	2時間給電
交流無停電電源装置	容量(kVA)	250	250
	寸法(W×D×H) (注)W=W1+W2	3m×1m×1.95m	3m×1m×1.95m
	交流入力	3φ3線 AC440V	3φ3線 AC440V
	直流入力	DC360V	DC360V
	交流出力	AC200、210、380、400、 440V	AC200、210、380、400、 440V
	定格周波数	50又は60Hz	50又は60Hz
	数量(台)	2	2
蓄電池	電圧(V)	DC360V	DC360
	セル数	180	180
	容量(Ah)	600	1500
	寸法 (W×H×L)	1.02m×1.85m×4.8m	1.3m×1.86m×10.4m
	数量(組)	2	2

表 4.3-7 各燃料貯蔵方式の電源容量

対象	水・燃料貯蔵方式										無停電電源負荷			
	ガス貯蔵方式										A系 (kW)		B系 (kW)	
	対象機器	基数	定格出力 (kW/基)	電源区分 常用	非常用	無停電 ^①	運転時 (kW)	非常用 (kW)	非常用GT負荷 B系 (kW)	非常用GT負荷 A系 (kW)	無停電電源負荷 B系 (kW)	無停電電源負荷 A系 (kW)		
炉内燃料移送系	燃料移送装置	1式	25	○	○	25	25	○	○	○	○			
	炉内中継装置	1式	5	○	○	5	5	○	○	○	○			
炉外燃料移送系	燃料移送装置	1式	20	○	○	20	20	○	○	○	○			
	燃料移送装置	1式	16	○	○	16	16	○	○	○	○			
燃料貯蔵系	燃料貯蔵装置	4	8	○	○	32	32	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	4	11	○	○	44	44	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	2	15	○	○	30	30	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	2	22	○	○	44	44	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	2	22	○	○	44	44	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	2	15	○	○	30	30	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	2	20	○	○	40	40	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	1式	25	○	○	25	25	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	4	30	○	○	120	120	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	4	12	○	○	48	48	○	○	○	○			
燃料貯蔵系	燃料貯蔵装置	2	15	○	○	30	30	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	1式	10	○	○	10	10	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	4	13	○	○	52	52	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	4	13	○	○	52	52	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	1式	12	○	○	12	12	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	1式	24	○	○	24	24	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	2	150	○	○	300	300	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	2	95	○	○	190	190	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	2	68	○	○	136	136	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	2	11	○	○	22	22	○	○	○	○			
燃料貯蔵系	燃料貯蔵装置	2	5	○	○	10	10	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	1式	10	○	○	10	10	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	4	5	○	○	20	20	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	1式	20	○	○	20	20	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	4×6	11	○	○	66	66	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	4×6	15	○	○	90	90	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	551	1180	○	○	2362	2362	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	796	781	○	○	1587	1587	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	480	460	○	○	960	960	○	○	○	○			
	燃料貯蔵装置	617	617	○	○	1234	1234	○	○	○	○			
合計						863.75	862.25	870	485.25	36	26			

注1) 表中、原色は常時稼働の機器を示す。
 注2) 燃料貯蔵装置のうち、系統のバブルや、ドラムバブル運動機構などの電気負荷容量は考慮していない。
 注3) ①は30分、②は2時間の全交直流電源喪失を想定した割合に、無停電電源に接続する燃料貯蔵装置、詳細検討が必要であるが、ナトリウムボタリ燃料を移送する燃料貯蔵装置は、約200℃の低温状態で燃料貯蔵するため、2時間の全交直流電源喪失を想定しても燃料貯蔵装置の稼働に支障はないと見込まれることとした。
 注4) ①は30分、②は2時間の全交直流電源喪失を想定した割合に、無停電電源に接続する燃料貯蔵装置、詳細検討が必要であるが、ナトリウムボタリ燃料を移送する燃料貯蔵装置は、約200℃の低温状態で燃料貯蔵するため、2時間の全交直流電源喪失を想定しても燃料貯蔵装置の稼働に支障はないと見込まれることとした。
 注5) 使用時間の異なる電気負荷容量を合計した数値。非常用GT負荷は、原子炉運転中/燃費中に分けて記載

非常用ガスタービン容量
-638kW × 1.1 × 2系併上
434.75kW × 1.1 = 1890kW

非常用ガスタービン容量
-617kW × 1.1 × 3系併上
B系、予備機) = 2040kW

無停電電源容量
-500kVA、3000Ah

無停電電源容量
-60kVA、180Ah

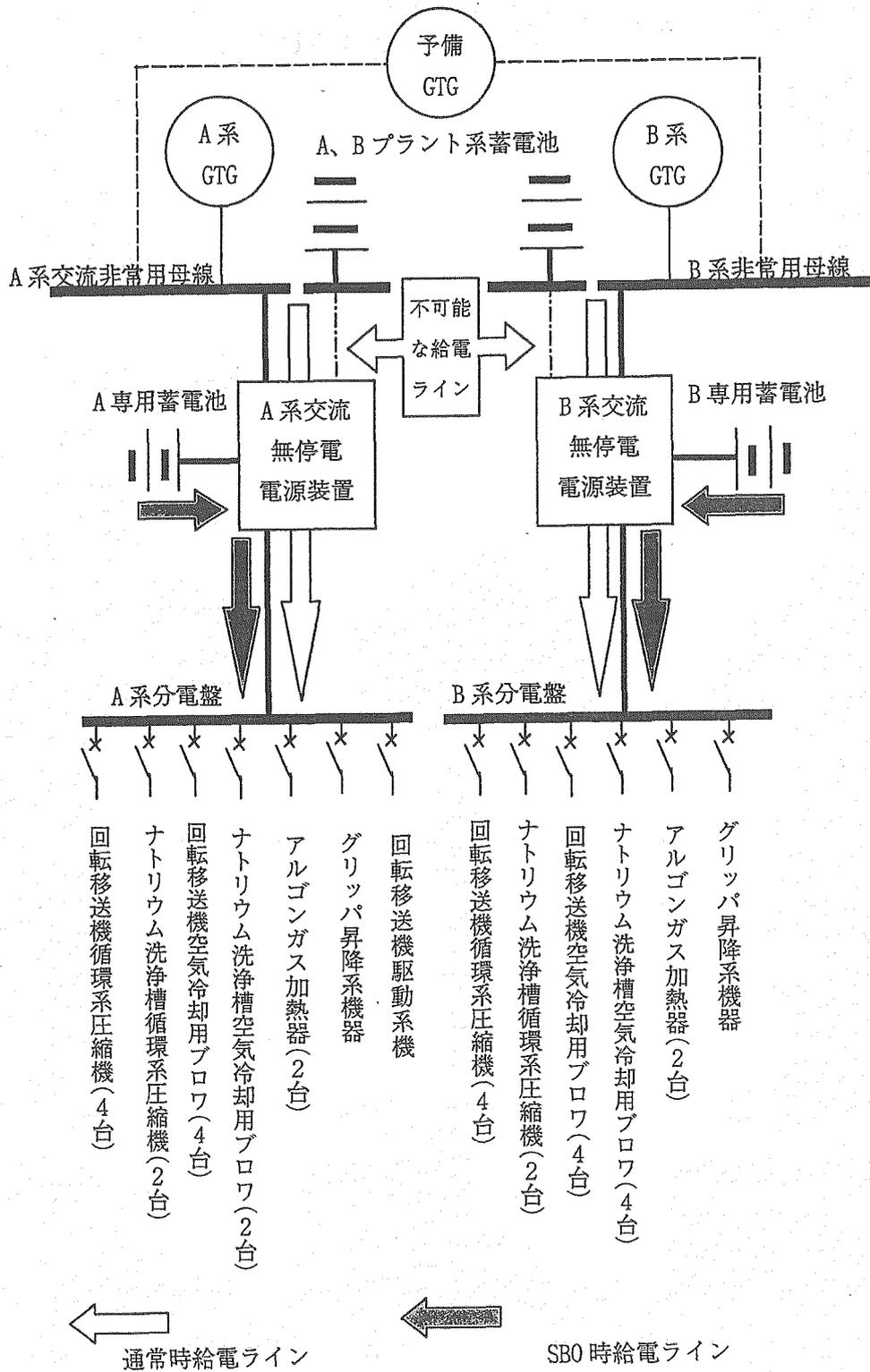


図 4.3-1 燃料取扱系無停電電源の単線結線図

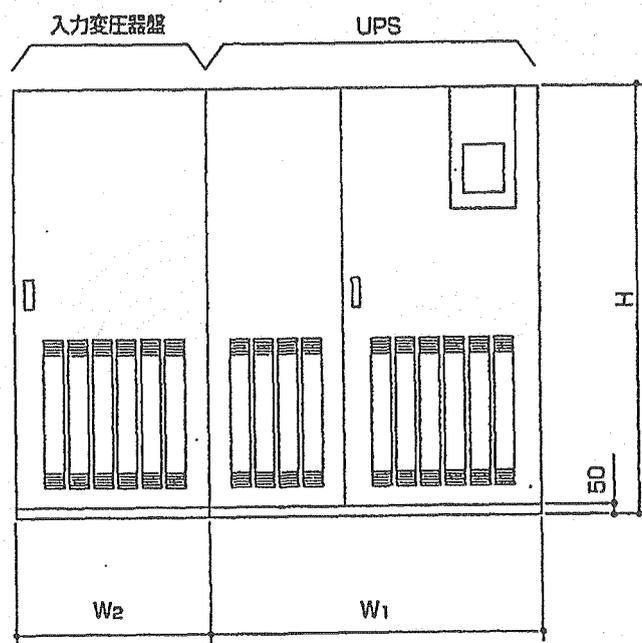


图 4.3-2 交流無停電電源装置外觀図

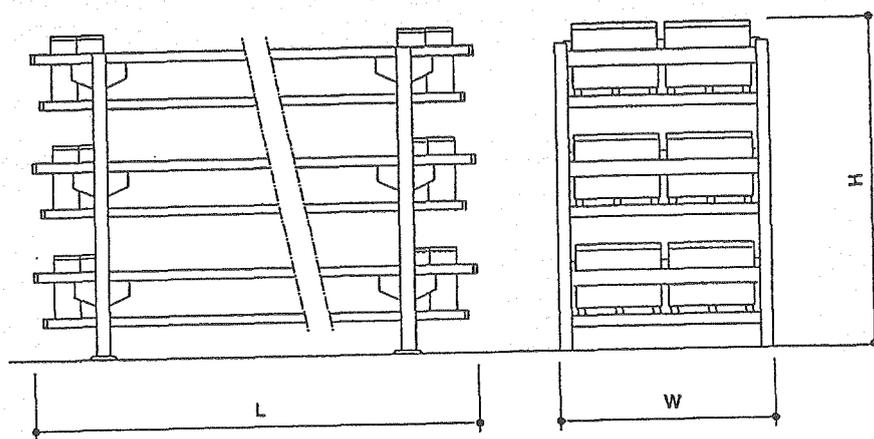


图 4.3-3 架台式蓄電池外觀圖

4.4 燃料取扱方式の比較評価

(1) 概要

物量及びコスト、安全性、運転性、プラントとの整合性の観点より、水プール直接貯蔵方式と EVST 方式の燃料取扱設備の比較評価を行った。上記のうち、EVST 方式のみ、炉外での複数体ポット中燃料へのアクセス性を考慮して、複数体移送方式を採用している。

(2) 物量及びコスト

水プール直接貯蔵方式では、燃料貯蔵設備の物量が EVST 方式の約 0.71 倍と小さい。一方、燃料交換時に原子炉から取出した高発熱燃料を使用済燃料プールまで移送するため、以下の観点より、燃料移送設備の物量が逆に約 1.3 倍に増加する。

- ① 回転機能を有するナトリウムポット取扱設備より、新燃料と使用済燃料の動線フローを区分けして、専用の新燃料移送設備を設置する。
- ② ガス中裸状態の高発熱燃料の取扱に対して、以下の除熱対応を行う。
 - ・アルゴンガス系の流量や、除熱容量などの設備容量を増加
 - ・冷却機能喪失の防止を考慮して、冷却システムを多重化（2 系統×2 基/系統（動的機器のみ）×50%）
 - ・最大 2 時間の全交流電源喪失を想定して（DBE で 30 分、BDBE で 2 時間）、ブロワなどの動的機器は、無停電電源に接続

各燃料貯蔵方式の物量比較を表 4.4-1、コスト比較（コマンドコストコードの知見に基づく評価）を表 4.4-2 に示す。コスト比較では、燃料取扱設備及びプラント全体コストを記載した。このうち、燃料取扱設備コストは、系統機器構成以外に、水プール直接貯蔵方式で電源関連、EVST 方式で建屋配置関連のコストを追加した。また、プラント全体コストは、稼働率を考慮した数値も記載した。

水プール直接貯蔵方式は、EVST 方式と比較して、燃料取扱設備全体の物量が約 7%と小さく、約 8%のコストを低減できる見通しである。ただし、プラント全体に対する燃料取扱設備のコスト割合は約 4%と小さいため、EVST 方式でも、複数体移送の採用による稼働率向上効果を取込めば、水プール直接貯蔵方式と同程度のコストを達成できる可能性を有している。

(2) 安全性

水プール直接貯蔵方式と EVST 方式では、ガス中裸燃料取扱時の除熱対応が相違する。水プール直接貯蔵方式では、高発熱燃料の取扱に伴い、冷却機能停止時の時間余裕が小さいため、更なる系統機器の多重化により、冷却機能喪失を排除する。DBE 内で、燃料下端がナトリウム、又は、水中に浸漬した状態で昇降停止する事象を取扱わねばならないが、燃料受渡位置での昇降装置の追設や、非常用注水タンクを設置するなどの設計対応の取込みにより、燃料破損の排除が可能である。また、BDBE での燃料破損に対して、非常用注

水系などの使用により、燃料溶融を防止し、格納性を維持できる可能性を有していると考えられる。

以上より、EVST 方式に対して、ガス中裸状態で高発熱燃料を取扱う水プール直接貯蔵方式では、安全性のポテンシャルは低下するが、設計対応により、安全性を確保することが可能と考えられる。ただし、冷却ガス無駄流れを考慮した場合は冷却系物量が増大し、外部電源喪失時に冷却を確保するため無停電電源容量が増大する可能性がある。

(3) 運転性

水プール直接貯蔵方式、EVST 方式のいずれも、原子炉からナトリウムポット取扱設備（または EVST）間の燃料取扱によって、燃料交換時間が決定する。水プール直接貯蔵方式では、ナトリウムポット取扱設備の構造工夫により、1 体移送の条件で、EVST 方式と同程度の燃料取扱期間（約 45 分/体）を達成することが可能である。

ただし、水プール直接貯蔵方式では、並行して、乾式洗浄や、ナトリウムポット取扱設備から使用済燃料プールまでの燃料移送を行う一方、ナトリウムポット取扱設備上での乾式洗浄や、走行式ガス中移送機の採用など合理化方策を取込んでいる。

EVST 方式では、複数体移送の採用に伴い、45 分/体から 31 分/体へ燃料交換時間の短縮が可能である。また、炉内中継装置は、可動部の削除に伴い、炉内保管が可能のため、準備・後始末期間を含めて合計約 2 日間の燃料交換期間を短縮できる。

(4) 破損燃料対応

水プール直接貯蔵方式、EVST 方式のいずれも、ナトリウムポットを使用することにより、破損燃料の早期取出しが可能である（放射性物質の格納性は確認必要）。ただし、使用済燃料プール中に破損燃料を貯蔵できないため、水プール直接貯蔵方式では、専用のナトリウムポット貯蔵設備を新設する。一方、EVST 方式では、EVST 内に破損燃料貯蔵位置を確保すれば良い。

(5) 炉心退避

水プール直接貯蔵方式の炉心退避期間は約 70 日である。一方、EVST 方式では、EVST 貯蔵中の使用済燃料を移動するなどの作業が必要で、炉心退避までに約 1 年間所要する。ただし、燃料取扱設備全体の物量が約 45ton 増加するが、燃料出入機の冷却容量の増加などの設計工夫により、早期炉心退避を実現できる可能性を有している（3.4.5 項参照）。

(6) まとめ

水プール直接貯蔵方式と EVST 方式の燃料取扱設備の比較評価を表 4.4-3 に示す。物量および経済性については水プール直接貯蔵方式は EVST 削除により貯蔵系設備を低減しているが移送系の物量が増加するため、全体物量としては EVST と比較して 7%程度の削減と

なり、EVST が複数体移送方式を採用してプラント稼働率を向上する効果を考慮すると経済性はほぼ同等と評価される。

安全性は水プール直接貯蔵方式ではガス中裸状態で高発熱燃料を取扱うが、冷却系の多重化などの設計対応により、安全要求条件を満足できる見通しである。ただし、冷却ガス無駄流れを考慮した場合の冷却系、無停電電源への影響を評価する必要がある。

運転性は水プール直接貯蔵方式は燃料交換中にナトリウム洗浄、水中浸漬などの作業を行うため EVST 方式と比較して煩雑だが、作業時間の短縮等を取り込めば 1 体当たり 45 分の燃料交換時間を達成可能である。ただし、燃料昇降装置における雰囲気分離に必要な時間等を今後検討する必要がある。

以上より、水プール直接貯蔵方式は EVST 方式と比較して高発熱燃料の裸ガス中取扱および水浸漬の課題を有するにもかかわらず大幅な物量削減が期待されないとの評価となった。今後、水プール直接貯蔵を活かしたさらなる物量削減を検討する必要がある。

表 4.4-1 各燃料貯蔵方式の物量比較

対象	水プール直接貯蔵方式			EVST貯蔵方式		
	基本仕様	基数	物量(ton) ¹⁾	基本仕様	基数	物量(ton) ¹⁾
炉内燃料移送系	燃料交換機	マニフレータ式	20	マニフレータ式	1基	20
	炉内中継装置	回転式 ⁵⁾	60	固定式(複数体移送対応) ⁵⁾	4基	80
炉外燃料移送系	燃料出入機	レール式(収納筒1基、Naポット専用、空気間接冷却系2系統)	175	レール式(収納筒1基、Naポット及び裸燃料、Aカス直接冷却及び空気間接冷却系2系統、複数体移送対応)	1基	195
	使用済燃料移送関連	Naポット取扱設備	35			
燃料貯蔵系	新燃料移送関連	ガス中移送機	40			
	使用済燃料移送関連	燃料昇降装置 ²⁾	35	燃料昇降装置 ²⁾	1基	15
	新燃料移送関連	水中台車	20	水中台車	1基	10
	使用済燃料移送関連	使用済燃料プール移送機	50	使用済燃料プール移送機	1基	50
	新燃料移送関連	新燃料移送機	50			
	使用済燃料移送関連	使用済燃料プール ⁶⁾	490	炉外燃料貯蔵槽	1基(370体)	570
	新燃料移送関連	新燃料貯蔵トラック ³⁾	155	使用済燃料プール ⁶⁾	1基(1365体)	335
燃料処理系	燃料洗浄設備	乾式燃料洗浄設備(Naポット取扱設備上での洗浄、カス移送機の冷却系使用)	25	乾式燃料洗浄設備(EVST上での洗浄、燃料出入機の冷却系使用)	1基	25
	破損燃料取扱関連	燃料検査設備	20	燃料検査設備(複数体移送対応)	1基	30
その他	ナトリウム	Naポット貯蔵設備 ⁴⁾	60	EVST一次及び二次ナトリウム		280
	物量合計 ⁷⁾		1235			1330

注1) 原則的に各メカ提示値を記載。ただし、各燃料取扱方式で同一、又は、類似仕様の設備で、メカ間で物量が異なる場合には、実証炉の物量などをとに外挿

注2) メカ提示概念では、ガス中移送機、又は、燃料出入機が水中台車に直接アクセスするが、Na-水雰囲気分離の観点より、追加設置

注3) メカ側より、130ton(貯蔵容量302体)のデータが提示されたが、4モジュール連続燃交に対応可能な貯蔵容量を確保するために、155ton(貯蔵容量364体=112体+84体×3)に見直し

注4) メカ提示物量の20tonと大きく相違するが、合計6基のNaポット貯蔵設備+空気間接冷却系(10ton/基、空気間接冷却系の物量は燃料出入機を参照)の設置を想定して、物量を見直し

注5) いずれも案内筒の一部はモジュールごとに設置(回転トラック式炉内中継装置の駆動部分はモジュールで共用)

注6) 使用済燃料プールの物量のうち、貯蔵トラック及びライナーはEVST貯蔵方式側、冷却系は実証炉の数値などをとに外挿

注7) 物量合計に、ナトリウム重量は含まず

表 4.4-2 各燃料貯蔵方式のコスト比較

対象	水プール直接貯蔵方式		EVST貯蔵方式	
	炉内中継装置 燃料交換機、炉内中継装置 燃料出入機 上記以外の燃料移送機 移送系小計	21.6 17.8 12.7 52.0	燃料交換機、炉内中継装置 燃料出入機 上記以外の燃料移送機 移送系小計	15.2 19.8 4.4 39.4
燃料貯蔵系	使用済燃料関連		炉外燃料貯蔵槽 炉外燃料貯蔵槽 使用済燃料プール	31.4 8.4 25.1
	新燃料関連			
	小計	36.9 3.5 40.4		64.9
燃料処理系	燃料洗浄関連	1.0	燃料洗浄設備	0.9
	破損燃料取扱関連	1.4	燃料検査設備	2.1
	小計	4.6	燃料処理系小計	3.0
ナトリウム	EVST関連	7.0		0.7
その他		0.6	建屋配置関連の追加分 ³⁾	0.8
燃料取扱設備 ¹⁾	合計	100.0		108.8
プラント全体 ¹⁾	合計(稼働率考慮せず)	100.0		100.3
	合計(稼働率考慮、ケース1) ⁴⁾	100.0		100.0
	合計(稼働率考慮、ケース2) ⁵⁾	100.0		99.9

注1) 水プール直接貯蔵方式の合計を100とする相対値

注2) 水プール直接貯蔵方式の方が非常用ガスタービン及び専用バッテリー電源の電源容量が大きく、これの増加分に相当するコストを記載
備冷却系の電源容量が大きいに起因)

注3) EVST貯蔵方式の方が原子炉補助建屋体積が1300m³大きく、これの増加分に相当するコストを記載

注4) EVST貯蔵方式の方が複数移送の採用に伴い、定換期間を約2日短縮(モジュールあたり、燃交本体で1日、炉内中継装置の取付け・取外して1日の合計2日)の可能性あり。2モジュールに対して、標準及び標準外のシース定換を想定して、稼働率は水プール直接貯蔵方式で95.47%(原子炉運転26か月×30日、定換36.75日)、EVST貯蔵方式で95.72%(原子炉運転26か月×30日、定換34.75日)と試算。

注5) タービン点検を31日から29日まで短縮すれば、EVST貯蔵方式の稼働率は95.83%(原子炉運転26か月×30日、定換33.75日)に向上

表 4.4-3 各燃料貯蔵方式の比較評価

項目 ¹⁾	物質	燃料移送系 燃料貯蔵系 燃料処理系 合計 燃料取扱系 プラント全体(稼働率考慮せず) プラント全体(稼働率考慮) ²⁾	Naポット取扱時 ガス中裸燃料取扱時 燃料下端がNa、または、水中 浸漬した状態での昇降停止 (DBE) 全交流電源喪失(DBE:30分、 BDDE:2時間) ガス中裸燃料取扱時における 被覆管制限温度までの到達 時間 燃料破損後の事象収束 (BDDE)	燃料取扱時間 燃料交換期間(1モジュール) ³⁾ 稼働率 燃料処理(原子炉運 転時の運用) 破損燃料対応 炉心退避対応	満足すべき条件 複数体移送による稼働率向上効果 をとり込むことにより、EVST貯蔵方式 のコストが水プール直接貯蔵方式と 差異がないこと	水プール直接貯蔵方式	EVST貯蔵方式	
経済性		485 ton 645 ton 105 ton 1235 ton 100.0(比較の基準) 100.0(比較の基準)				370 ton 905 ton 55 ton 1330 ton 108.8 100.3		○
コスト		100.0(比較の基準) 100.0(比較の基準)				99.9~100		○*
安全性	異常時対応	DBEでは、燃料過熱事象および落 下事象への設備対応が十分で、燃 料破損を防止できること	DBEでは、燃料過熱事象および落 下事象への設備対応が十分で、燃 料破損を防止できること	45分/体(燃交作業領域で、時間余裕なし) 約9日 95.7% (原子炉運転26か月、定検36.75日) 所定の期間内に終了可能	移送停止時には空気間接冷却系起動(独立2系統) 1系統機能喪失+待機系起動失敗時には、残りの冷却系起 動に対応(2系統×100%×2基/系統(動的機器のみ))。ま た、高熱燃料の取扱に伴い、ガス系容量増加 時間余裕がないため、燃料受渡し位置では昇降系を多重化 (例えば、ガス中移送機以外に、Naポット取扱設備中に昇降 シリンダ設置) 同時作動の系統機器を限定することにより、1500Ah/系統の 無停電電源に接続 10分	99.9~100	1系統機能喪失+待機系起動失敗時には、時間余裕を考慮 して冷却機能の確保されている場所に移送(独立2系統+移 送機能に期待) 30分以上の時間余裕を有するため、DBEの範囲で設置する 必要はない 燃料出入機の冷却系など一部の機器を対象として、90Ah/系 統の無停電電源に接続 49分	○*
Na漏えい対策		BDDEでは、万一の燃料破損を想定 しても、事象収束が可能であること プラント側と同程度のNa漏えい対策 が可能なこと	BDDEでは、万一の燃料破損を想定 しても、事象収束が可能であること プラント側と同程度のNa漏えい対策 が可能なこと	45分/体(燃交作業領域で、時間余裕なし) 約9日 95.7% (原子炉運転26か月、定検36.75日) 所定の期間内に終了可能	燃料破損時には非常用注水系により冷却し、燃料溶融防止 燃料取扱系にNa系がなく(Naポット除く)、Na漏えい対策不要 か可能なこと	○*	低発熱燃料の取扱に伴い、短時間地上放散を想定しても被 ばく制限目安を満足できる見通し EVSTを設置するが、低温設計に加えて、Na冷却系にエンク ローンを設置するなど、プラント側と同程度以上のNa漏え い火災対策を実施可能 一体移送で45分/体も、複数体移送で34分/体まで低減可能 約7日 95.7~95.8% (原子炉運転26か月、定検33.75~34.75日) 作業工程が煩雑であるが、EVST空きスペースに新燃料を搬 入することなどにより、所定の期間内に終了可能な見通し EVST内に貯蔵可能で、これによる物量増加は極めて小。複 数体ポットの採用により破損燃料の早期取出しも可能 EVST中の使用済燃料移動に伴い、約1年と長い、仮設 キャスク、燃料出入機冷却容量の増加などの設計対応により 早期炉心退避の可能性有り	○
運転性	燃料交換	45分/体以内の燃料取扱時間を達 成できること	45分/体以内の燃料取扱時間を達 成できること	約9日 95.7% (原子炉運転26か月、定検36.75日) 所定の期間内に終了可能		○	低発熱燃料の取扱に伴い、短時間地上放散を想定しても被 ばく制限目安を満足できる見通し EVSTを設置するが、低温設計に加えて、Na冷却系にエンク ローンを設置するなど、プラント側と同程度以上のNa漏え い火災対策を実施可能 一体移送で45分/体も、複数体移送で34分/体まで低減可能 約7日 95.7~95.8% (原子炉運転26か月、定検33.75~34.75日) 作業工程が煩雑であるが、EVST空きスペースに新燃料を搬 入することなどにより、所定の期間内に終了可能な見通し EVST内に貯蔵可能で、これによる物量増加は極めて小。複 数体ポットの採用により破損燃料の早期取出しも可能 EVST中の使用済燃料移動に伴い、約1年と長い、仮設 キャスク、燃料出入機冷却容量の増加などの設計対応により 早期炉心退避の可能性有り	◎
燃料処理(原子炉運 転時の運用)				約9日 95.7% (原子炉運転26か月、定検36.75日) 所定の期間内に終了可能		○*	低発熱燃料の取扱に伴い、短時間地上放散を想定しても被 ばく制限目安を満足できる見通し EVSTを設置するが、低温設計に加えて、Na冷却系にエンク ローンを設置するなど、プラント側と同程度以上のNa漏え い火災対策を実施可能 一体移送で45分/体も、複数体移送で34分/体まで低減可能 約7日 95.7~95.8% (原子炉運転26か月、定検33.75~34.75日) 作業工程が煩雑であるが、EVST空きスペースに新燃料を搬 入することなどにより、所定の期間内に終了可能な見通し EVST内に貯蔵可能で、これによる物量増加は極めて小。複 数体ポットの採用により破損燃料の早期取出しも可能 EVST中の使用済燃料移動に伴い、約1年と長い、仮設 キャスク、燃料出入機冷却容量の増加などの設計対応により 早期炉心退避の可能性有り	○
破損燃料対応				約70日		○	低発熱燃料の取扱に伴い、短時間地上放散を想定しても被 ばく制限目安を満足できる見通し EVSTを設置するが、低温設計に加えて、Na冷却系にエンク ローンを設置するなど、プラント側と同程度以上のNa漏え い火災対策を実施可能 一体移送で45分/体も、複数体移送で34分/体まで低減可能 約7日 95.7~95.8% (原子炉運転26か月、定検33.75~34.75日) 作業工程が煩雑であるが、EVST空きスペースに新燃料を搬 入することなどにより、所定の期間内に終了可能な見通し EVST内に貯蔵可能で、これによる物量増加は極めて小。複 数体ポットの採用により破損燃料の早期取出しも可能 EVST中の使用済燃料移動に伴い、約1年と長い、仮設 キャスク、燃料出入機冷却容量の増加などの設計対応により 早期炉心退避の可能性有り	◎
炉心退避対応				約70日		○*	低発熱燃料の取扱に伴い、短時間地上放散を想定しても被 ばく制限目安を満足できる見通し EVSTを設置するが、低温設計に加えて、Na冷却系にエンク ローンを設置するなど、プラント側と同程度以上のNa漏え い火災対策を実施可能 一体移送で45分/体も、複数体移送で34分/体まで低減可能 約7日 95.7~95.8% (原子炉運転26か月、定検33.75~34.75日) 作業工程が煩雑であるが、EVST空きスペースに新燃料を搬 入することなどにより、所定の期間内に終了可能な見通し EVST内に貯蔵可能で、これによる物量増加は極めて小。複 数体ポットの採用により破損燃料の早期取出しも可能 EVST中の使用済燃料移動に伴い、約1年と長い、仮設 キャスク、燃料出入機冷却容量の増加などの設計対応により 早期炉心退避の可能性有り	○
総合評価					ガス中裸状態で高発熱燃料を取扱う必要はあるが、更なる 冷却システムの多重化などの設計対応により、安全要求条件を 満足できる見通し。 また、同時に複数の作業を実施する必要があるが、洗浄条 件の緩和や、高速ガスを利用した急速冷却などにより作業の 迅速化が可能で、時間余裕はないが、1基のガス中移送機に より、所定の燃料交換時間を確保可能 ただし、水プール直接貯蔵方式を採用しても、大幅なコスト 低減に期待できないため、選定せず	-	水プール直接貯蔵方式に対して、EVSTの設置に伴い、燃 料取扱設備コストが約9%増加するが、複数体移送による稼 働率向上効果を取込み、実質的に同程度のコストを達成 できる見通し。 よって、安全性および運転性向上のポテンシャルが高く、破 損燃料取扱の容易なEVST貯蔵方式を優先選定	選定

注1) 要求条件に対して、◎: 余裕を持って達成、○: 達成、△: 達成できず
注2) 電源設備容量(非常用ガスタービン、無停電電源)および建屋体積によるコスト差異も考慮済み
注3) 燃料交換期間は、燃料交換本体+燃料交換準備および始末の合計期間。燃料交換では112体の炉心構成要素を扱いき、22時間/日を想定

5. おわりに

ナトリウム冷却中型炉 4 モジュールプラントにおける燃料取扱設備として EVST 方式の全体システムを具体化して課題の整理を行った。また、燃料取扱設備の大幅合理化を目的として水プール直接貯蔵方式についても検討を行った。水プール直接貯蔵方式は貯蔵設備を大幅に削減可能だが移送系設備が増加するため EVST と比較して大幅な物量削減は期待できないことが明らかになり、さらに物量を削減した構成を追求する必要があると考えられる。

参考文献

- [1] 此村守、他：“高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズII 中間報告－原子力プラントシステム技術検討書－”、JNC TN9400 2004-035、(2004)
- [2] 尾崎博、南了吾、太田正一、「FBR 実証炉用マニプレータ式燃料交換機の開発」、FAPIG No.140(1995-7) p9-15
- [3] 尾崎博、他：“高速炉の燃料交換方式の高度化”、日本機械学会、No920-30、シンポジウム講演論文集、p341-345
- [4] H.Ozaki, et.al, "Study on Fuel Handling System Simplification", Proc. Int. Conf. On Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Kyoto, Japan, Oct. (1991)
- [5] 近澤佳隆、他：“ナトリウム冷却炉の燃料取扱時除熱解析評価”、JNC TN9400 2004-060、(2004)
- [6] 河野隆：“据付用マイクロローリの開発”、山九技報、No.3、p84-87、(1993)
- [7] 中村知親：“マイクロローリの作業事例と今後の開発構想”、山九技報、No.5、p6-10、(1995)
- [8] J., F., Briesmeister, Ed., "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C", LA-13709-M (April 2000)
- [9] 藤井正、他：“水プール直接貯蔵方式における使用済燃料冷却特性の検討”、JNC TN9400 2002-049、(2002)
- [10] 科学技術庁、全交流電源喪失事象ワーキンググループ、“原子力発電所における全交流電源喪失について”、報告書補足メモ、(1993)

謝辞

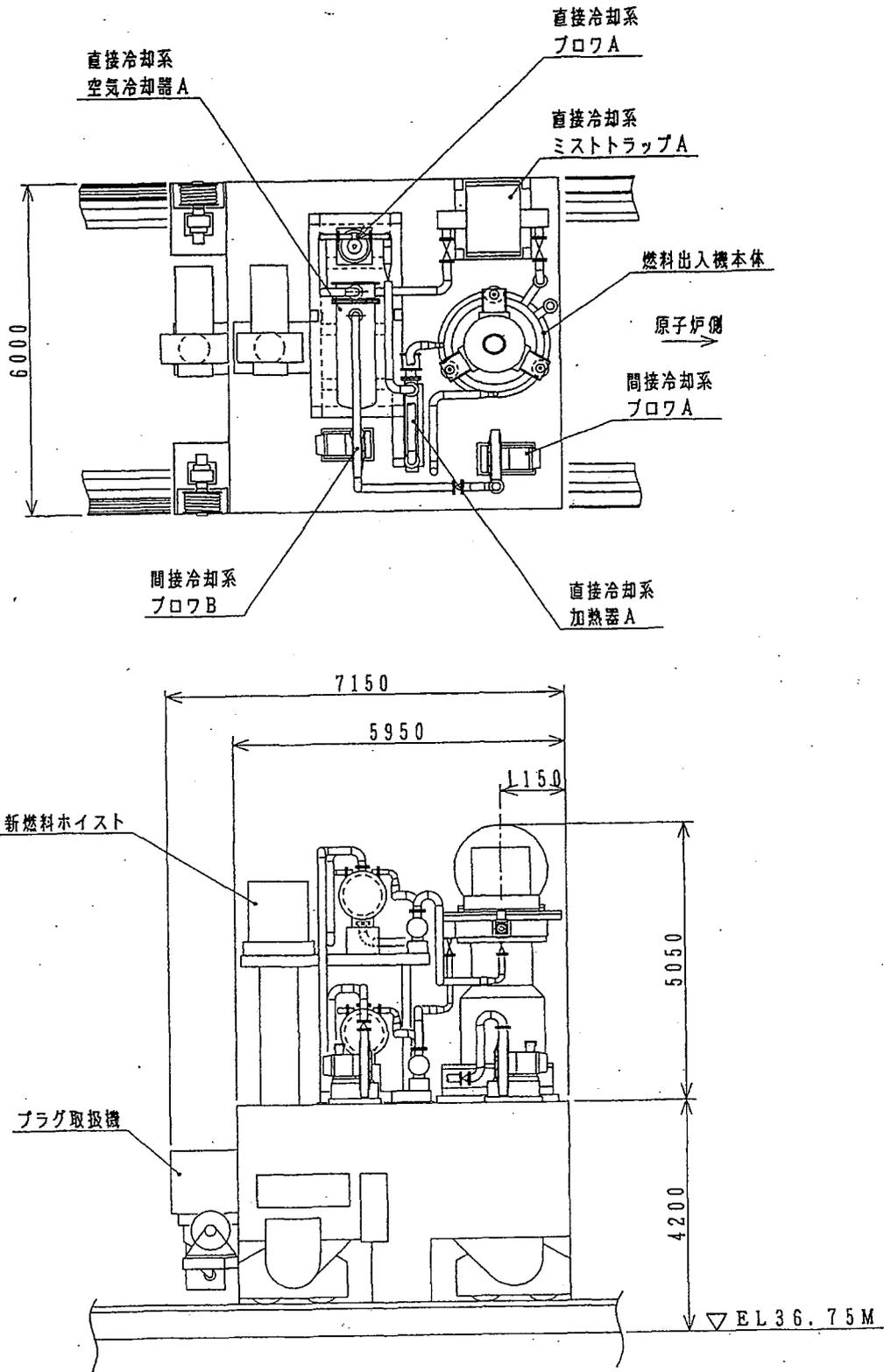
本報告書をまとめるにあたり広範な調査をしていただいた三菱重工の戸田幹雄氏、富士電機システムズの戸澤克弘氏、南了悟氏、川崎重工株式会社の赤津実氏、報告書編集に協力していただいた相澤康介氏に感謝します。

付録 1：燃料出入機固有値評価

平成 10 年度に実施された燃料出入機の固有値評価を以下にまとめた。解析条件を以下に示す。

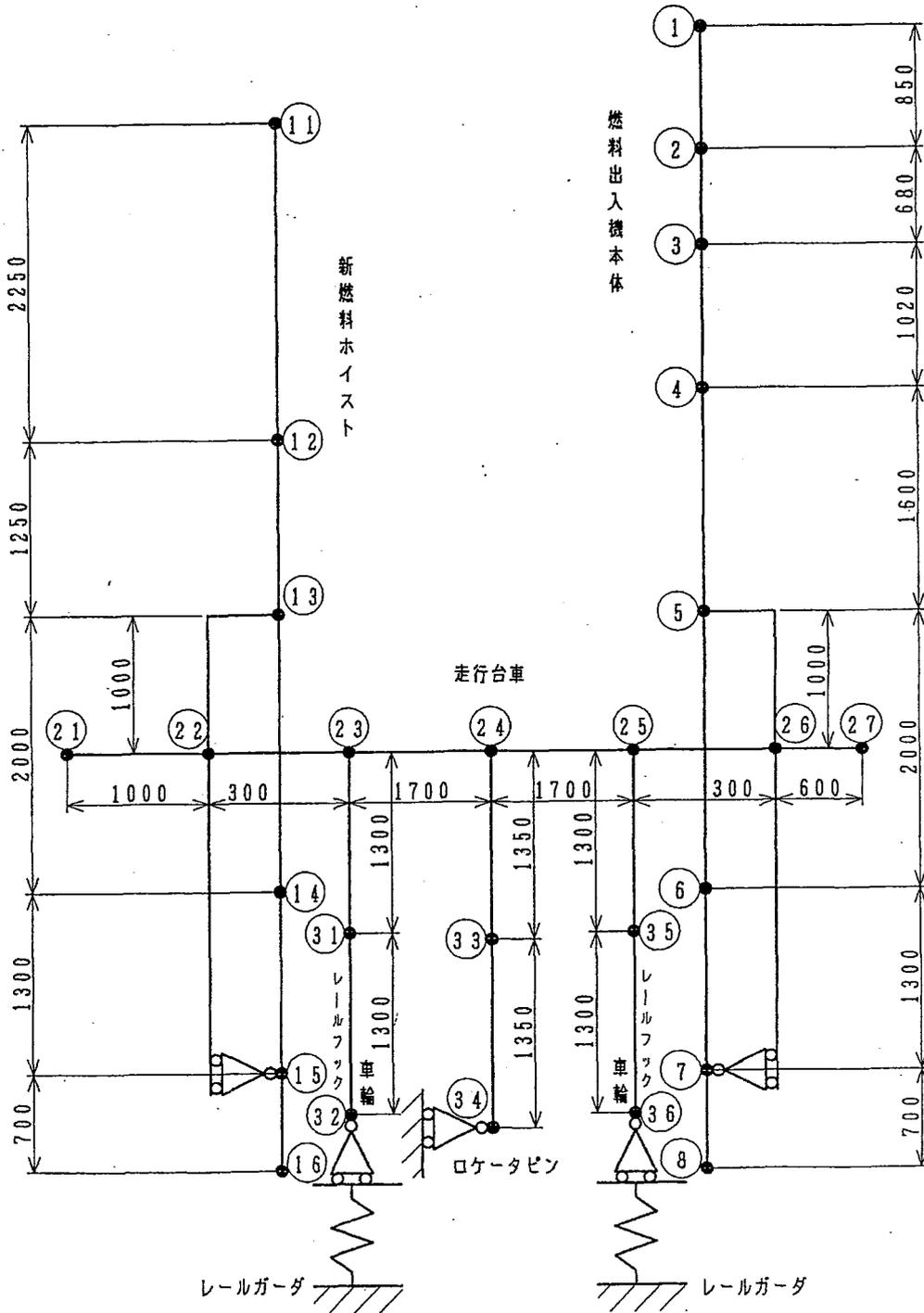
- ・解析対象 : レール方式燃料出入機 (付図 1-1 参照)
- ・解析コード : MSC/NASTRAN
- ・解析モデル : 付図 1-2~3 参照
- ・水平方向床応答曲線 : 付図 1-4
- ・上下方向床応答曲線 : 付図 1-5

固有振動モードの評価結果を付図 1-6~8 に示す。固有振動数はそれぞれ 3.78、5.78、11.9Hz と評価された。安定性検討では浮き上がり力 $133 \times 10^3 \text{kg}$ に対して復元力 73.5×10^3 と評価されレールフックによる転倒防止が必要であることが明らかになった。



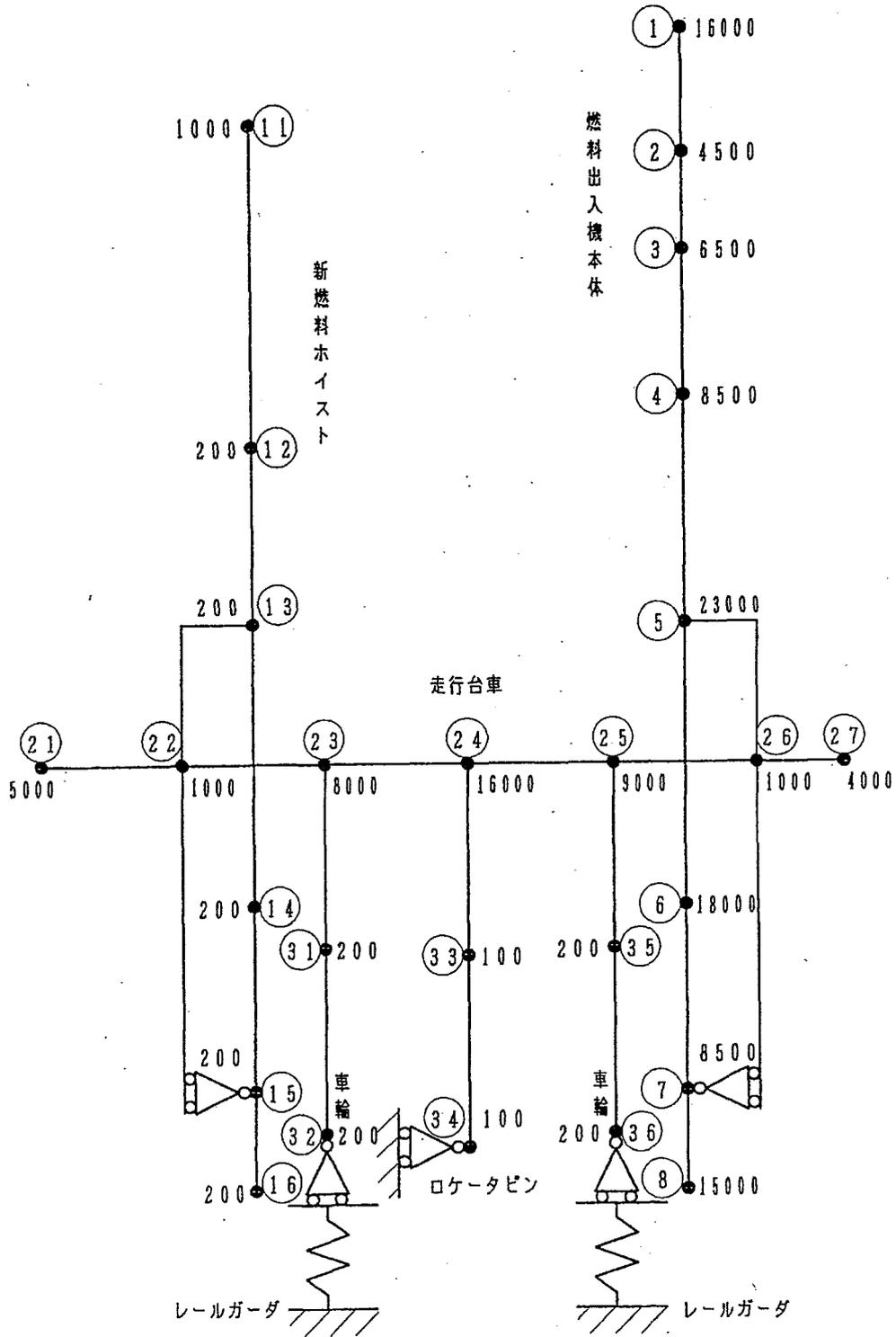
付図 1-1 燃料出入機固有値解析 (解析対象)

(単位: mm)

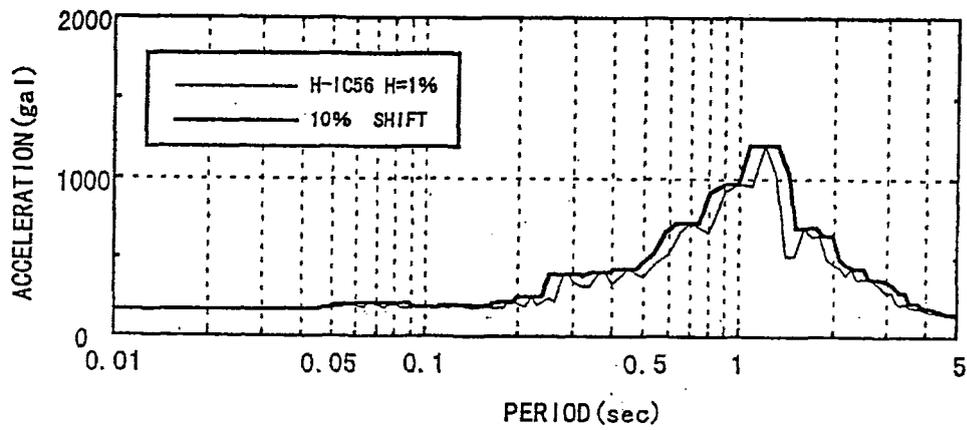


付図 1-2 燃料出入機固有値解析 (計算体系寸法)

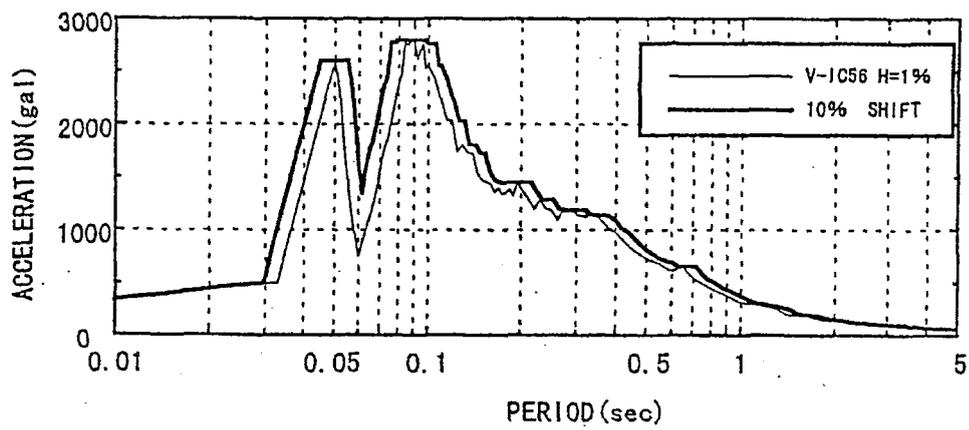
(単位: kg)



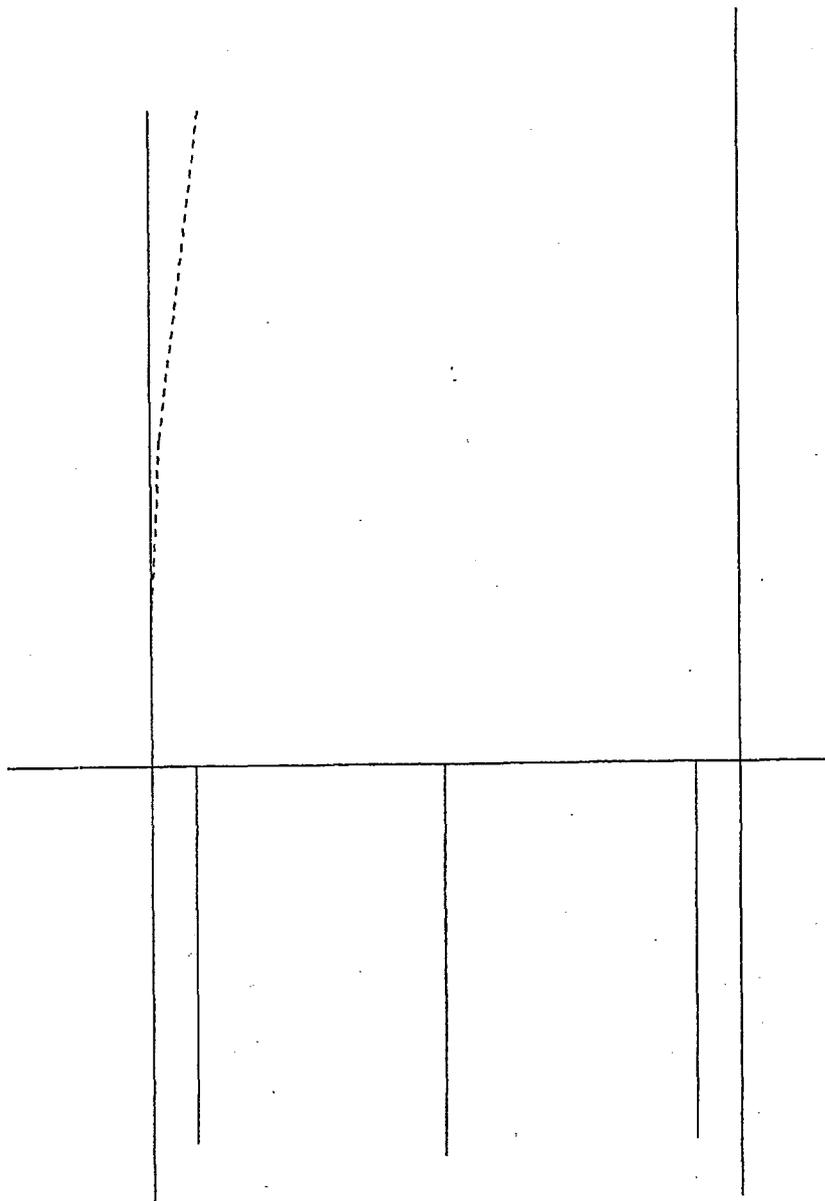
付図 1-3 燃料出入機固有値解析 (計算体系重量)



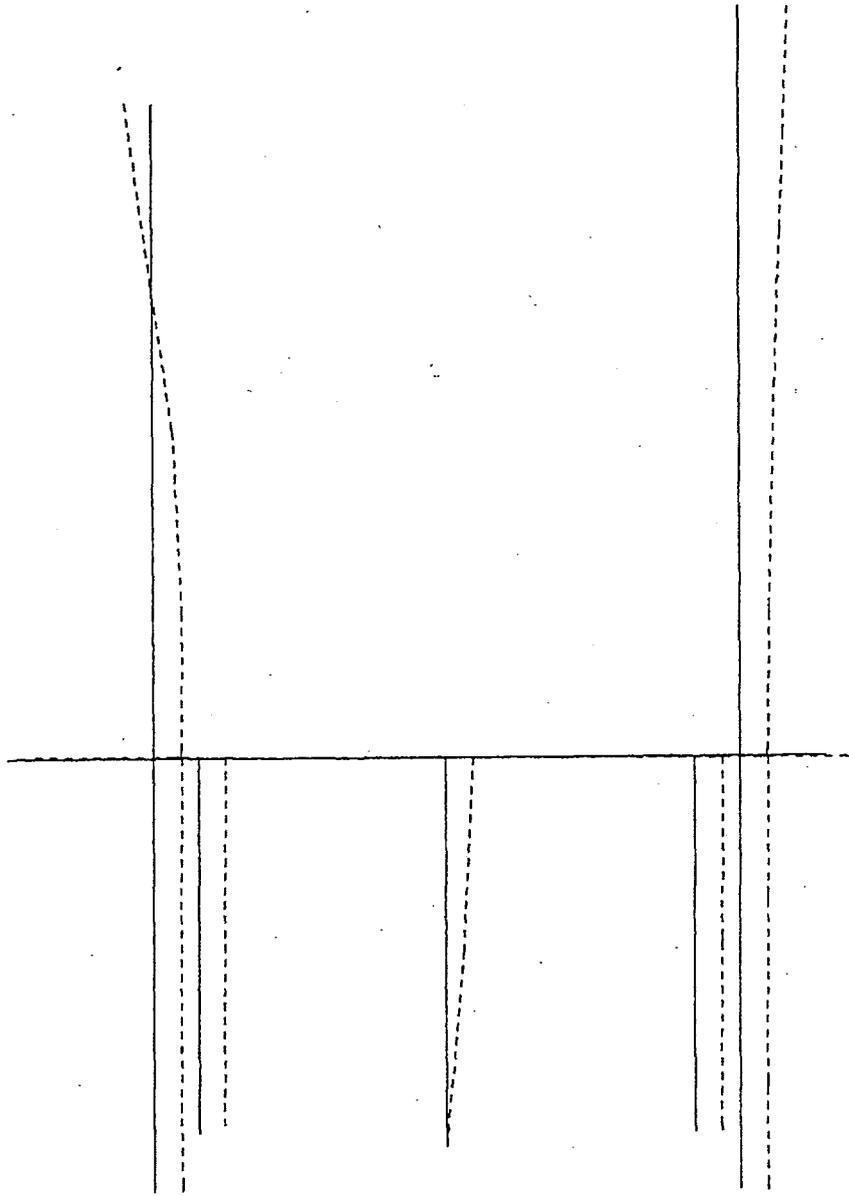
付図 1-4 燃料出入機固有値解析 (水平方向床応答曲線)



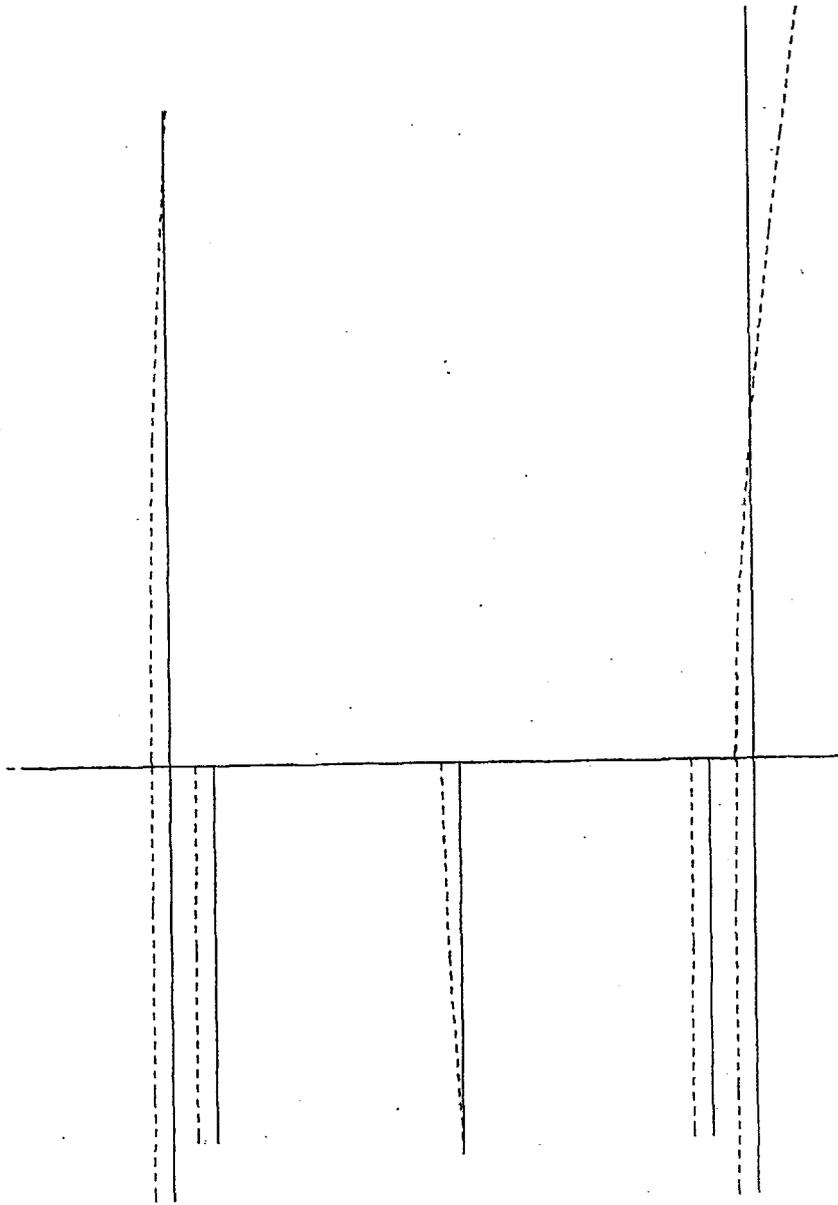
付図 1-5 燃料出入機固有値解析 (上下方向床応答曲線)



付図 1-6 燃料出入機固有値解析 (1 次モード解析結果 3.87Hz)



付図 1-7 燃料出入機固有値解析 (2 次モード解析結果 5.78Hz)



付図 1-8 燃料出入機固有値解析 (3 次モード解析結果 11.9Hz)

付録 2 : 乾式洗浄試験

付 2.1 概要

平成 11 年度においてアルゴンガスを用いた乾式洗浄の性能を評価するため模擬燃料集合体を用いた以下の試験が実施された。

- ・初期ナトリウム付着量確認試験
- ・アルゴンガス洗浄試験
- ・水浸漬試験

以下では試験内容の概要をまとめた。

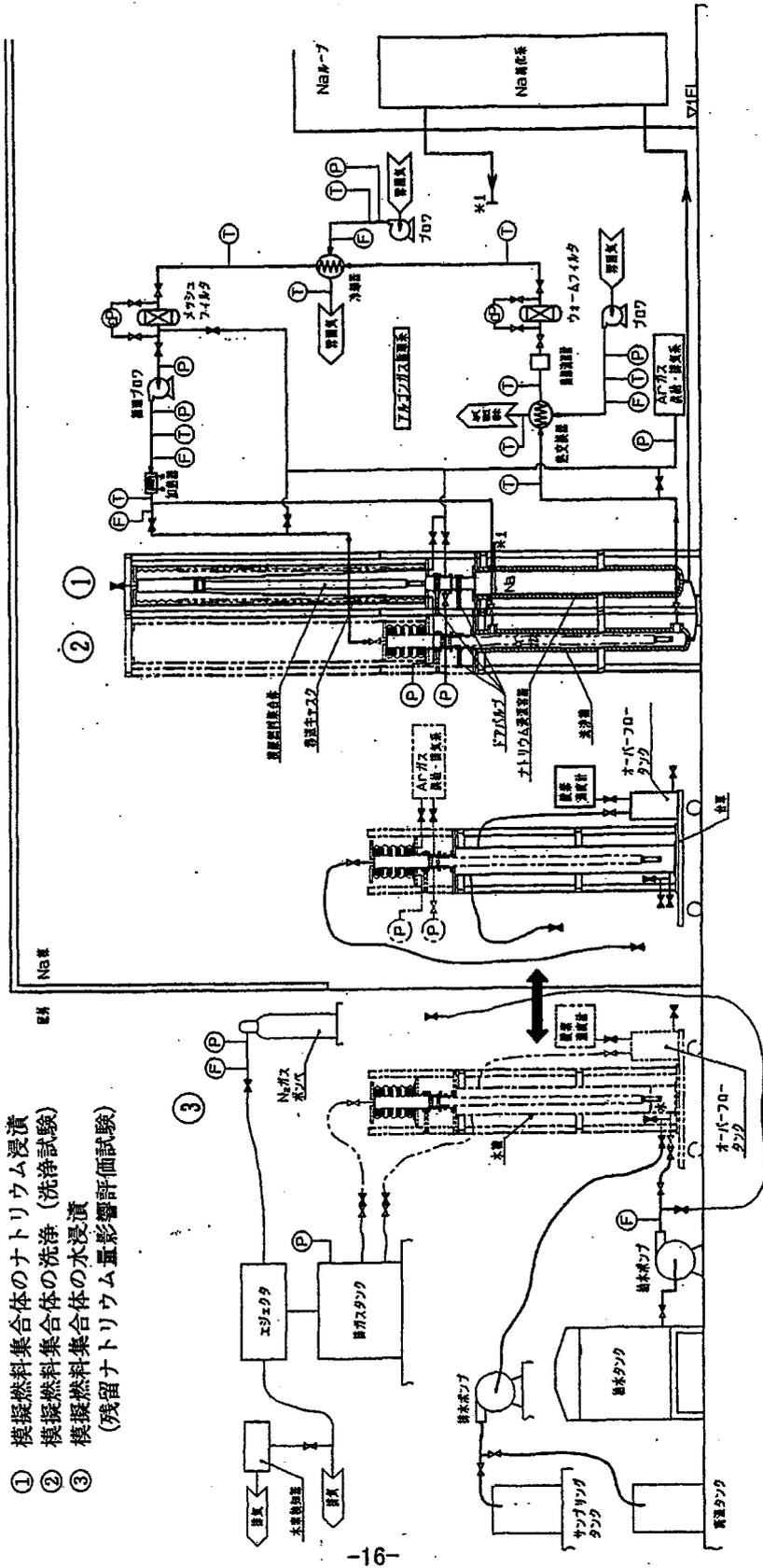
付 2.2 試験装置

試験装置は実機と同等の 217 ピンの模擬燃料集合体、ナトリウム浸漬装置、アルゴンガス洗浄槽、アルゴンガス循環系、水浸漬設備で構成される。本試験に使用した試験装置および試験体を以下にまとめた。

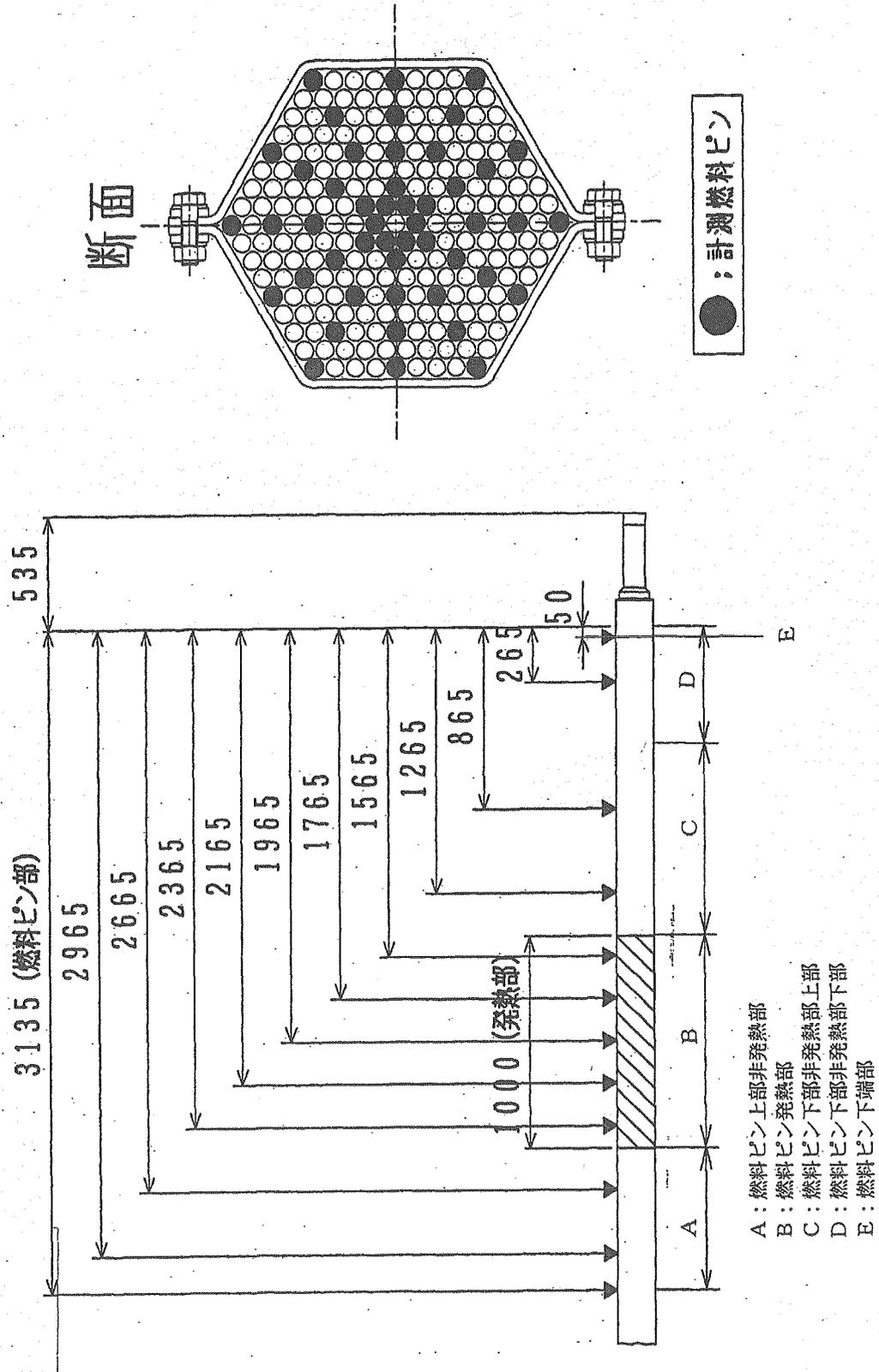
- ・試験装置概念図 : 付図 2.2-1
- ・模擬燃料集合体 (217 ピン) : 付図 2.2-2
- ・模擬集合体温度計測点 : 付図 2.2-3
- ・ナトリウム浸漬容器 : 付図 2.2-4
- ・アルゴンガス洗浄槽 : 付図 2.2-5
- ・アルゴンガス循環系 : 付図 2.2-6

【試験手順】

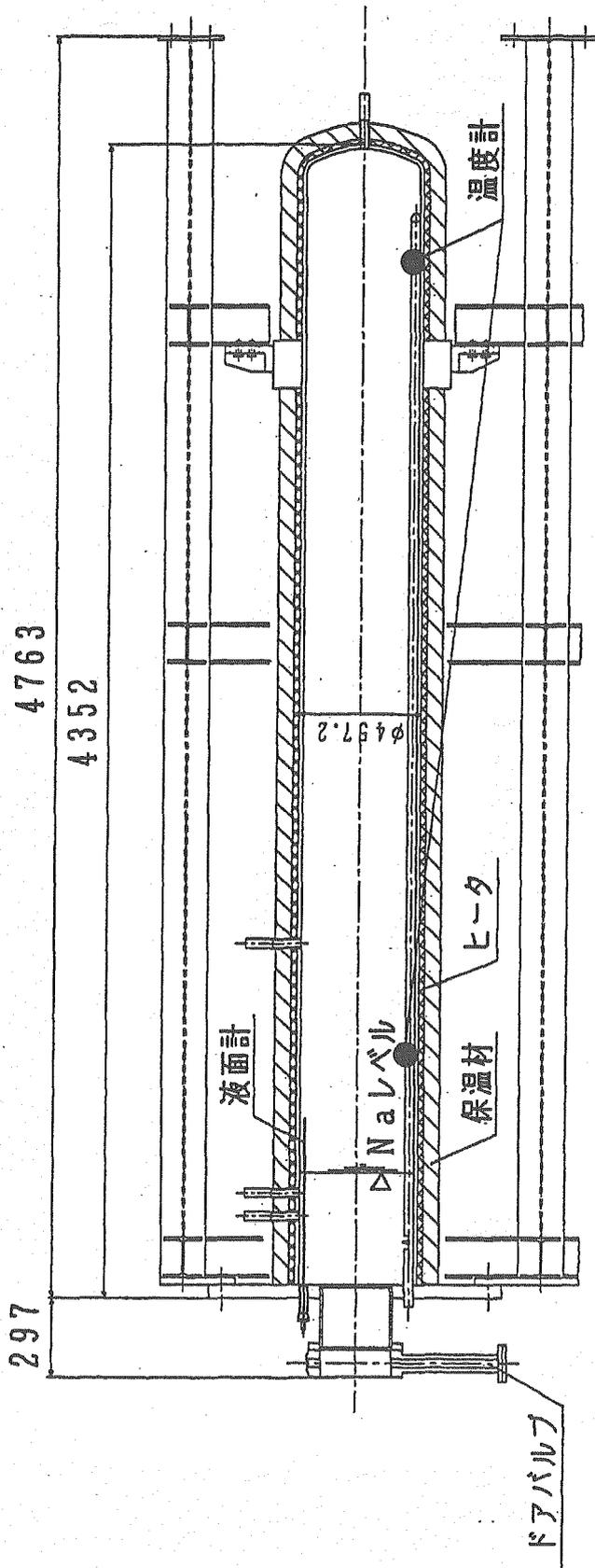
- ① 模擬燃料集合体のナトリウム浸漬
- ② 模擬燃料集合体の洗浄（洗浄試験）
- ③ 模擬燃料集合体の水浸漬
（残留ナトリウム量影響評価試験）



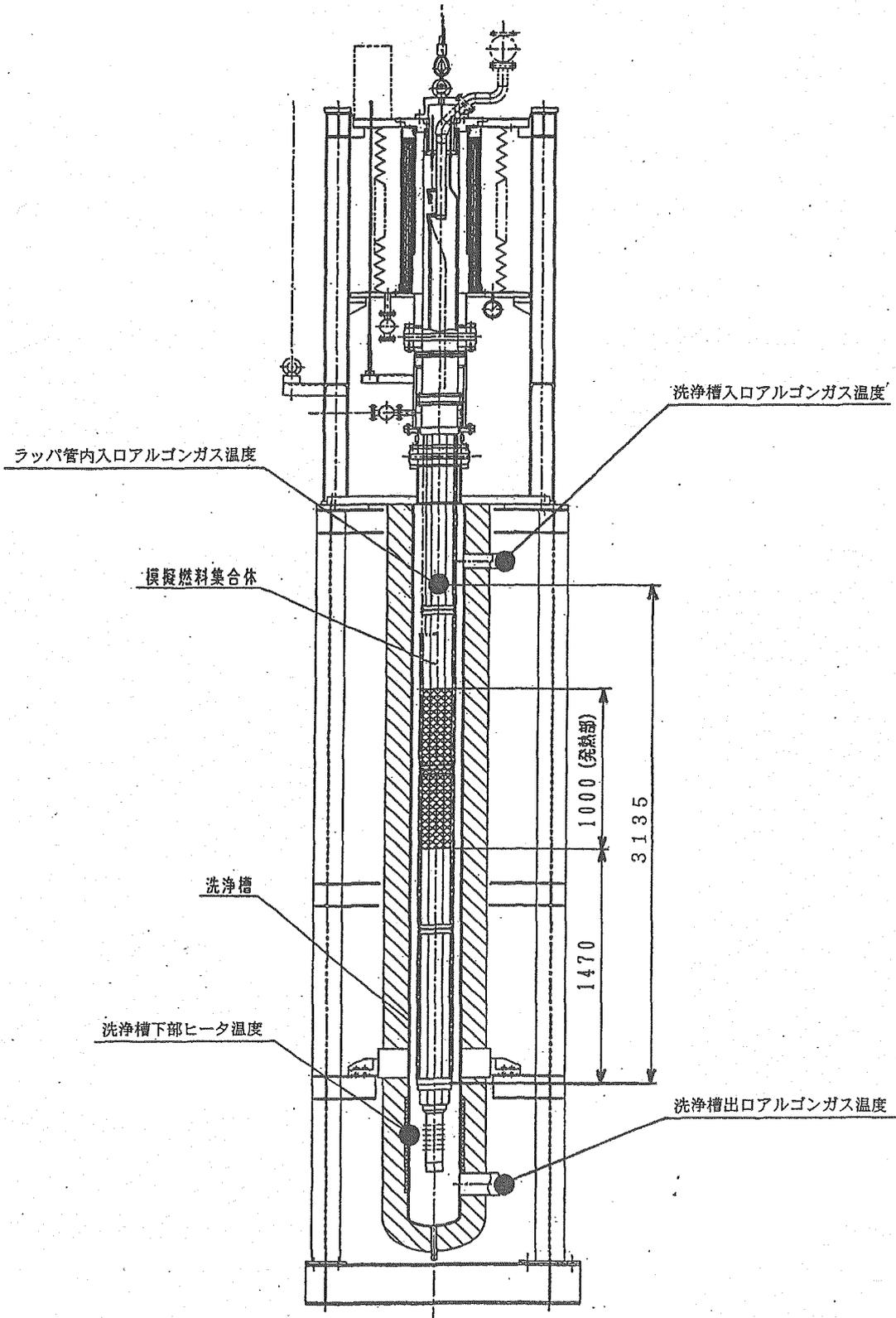
付図 2.2-1 乾式洗浄試験の試験装置全体図



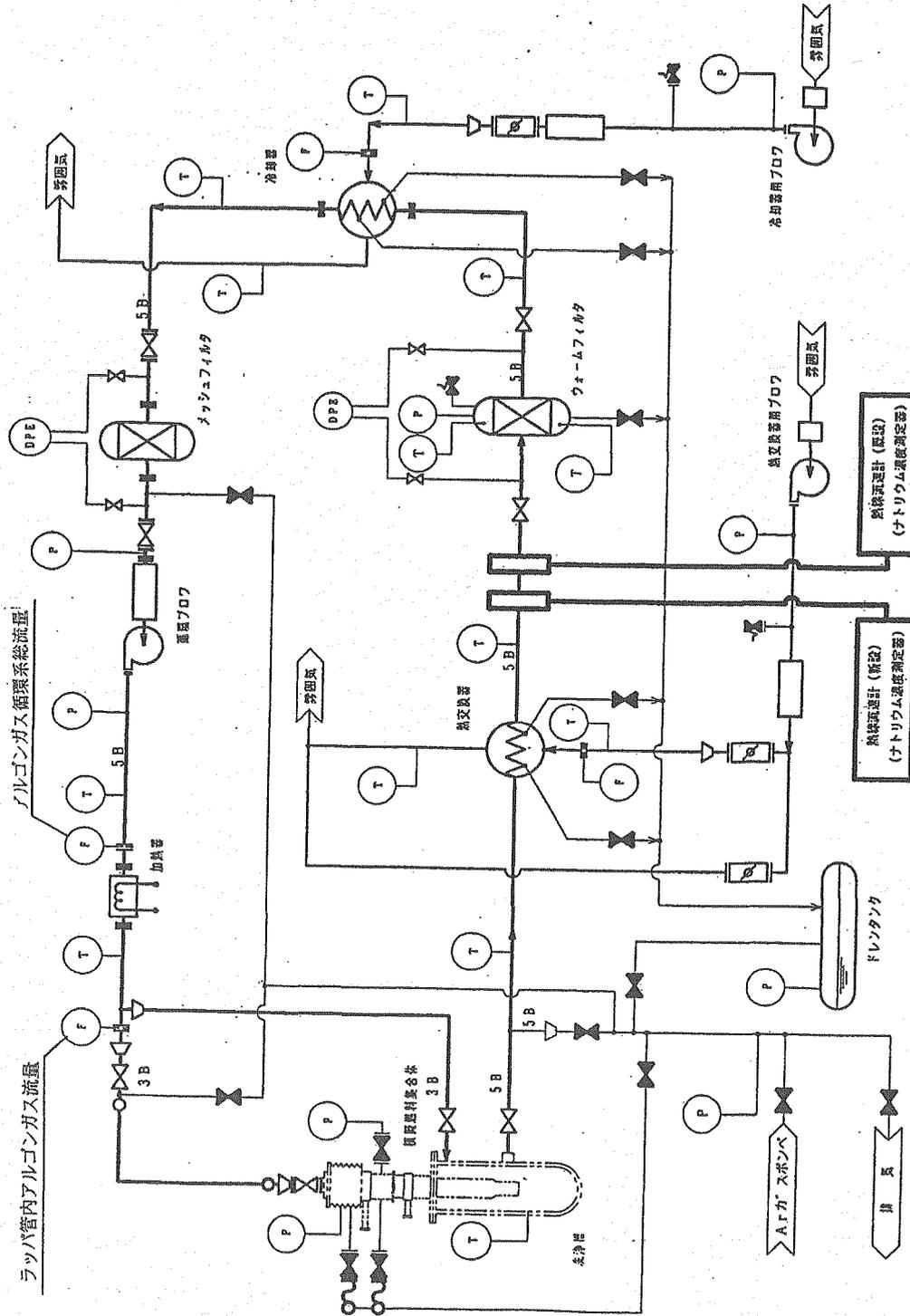
付図 2.2-3 乾式洗浄試験の模擬集合体温度計測位置



付図 2.2-4 乾式洗浄試験のナトリウム浸漬容器



付図 2.2-5 乾式洗浄試験のアルゴンガス洗浄槽



付図 2.2-6 乾式洗淨試験のアルゴンガス循環系

付 2.3 試験結果

付 2.3.1 初期ナトリウム付着量確認試験

(1) 試験条件

初期ナトリウム付着試験の試験条件を以下に示す。

- ・試験体予熱温度 : 約 500℃
- ・ナトリウム温度 : 200℃ (EVST 温度の下限値)

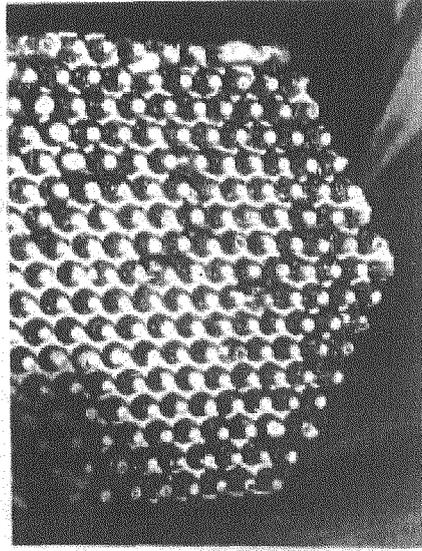
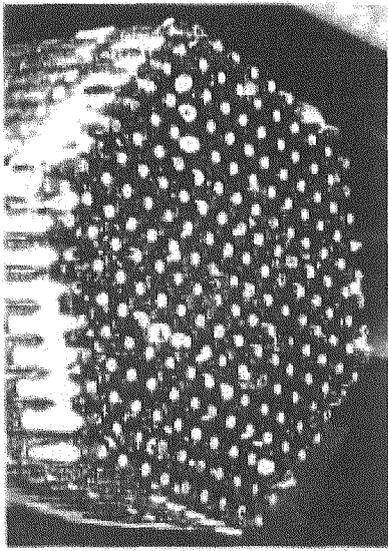
予熱後の模擬試験体をナトリウム中に浸漬し、燃料ピンの温度が安定した後、取出しナトリウム付着状況を確認の後にピン下端およびエントランスノズル部はナトリウム付着量が多いためアルコールにその他の部分は水に浸漬する。浸漬後の溶液をサンプリングしてイオンクロマトグラフ法によりナトリウム付着量を評価した。

試験は 3 回実施した。第 1 回目の試験は模擬集合体を分解しナトリウム付着状況を観察した (付図 2.3.1-1 参照)。燃料ピンバンドル部については全体にまだら状の付着が観察された。ラッパ管表面は全体に薄い膜状の付着が観察された。エントランスノズル部は厚い膜状の付着および粒状の付着が観察され流路孔も一部閉塞している。燃料ピン下端には塊状の付着が観察された。

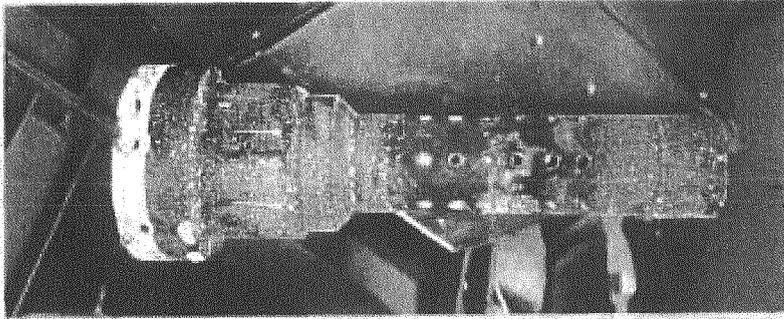
試験結果を付表 2.3.1-1 にまとめる。模擬集合体に付着した全ナトリウム量は各試験ケースで 315、311、361g、平均で 329g と評価された。エントランスノズル部および燃料ピン下端は集中してナトリウムが付着し全体の 4 割程度を占めることが明らかになった。

付表2.3.1-1 初期ナトリウム付着試験結果のまとめ

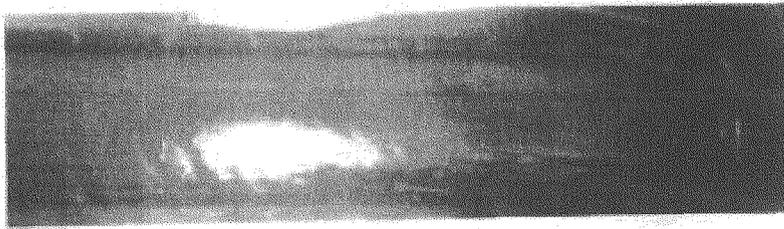
大項目	項目	単位	ケース1	ケース2	ケース3
試験条件	予熱温度(燃料ピン平均)	°C	470	511	519
	ナトリウム温度	°C	200	200	200
ナトリウム 付着量	ピン下端、エントランスノズル部	g	109	125	153
	その他	g	159	175	199
	不明	g	47	10	9
	合計	g	315	311	361
	平均±(90%信頼度幅)	g	329 ±47		



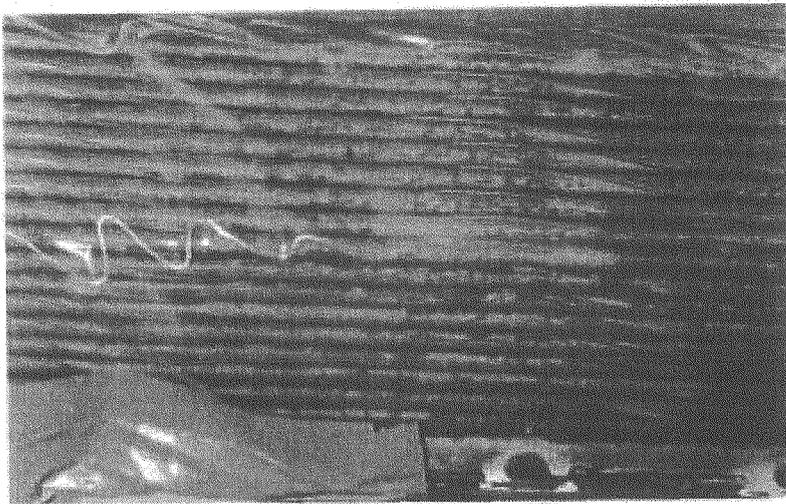
(ピン下端部)



(エントランスノズル部)



(ラップ管外面)



(ピンバンドル部)

付図 2.3.1-1 初期ナトリウム付着量確認試験のナトリウム付着状況

付 2.3.2 高温アルゴンガス洗浄試験

高温のアルゴンガスによる模擬燃料集合体洗浄試験の試験条件を下記に示す。

- ・ 集合体発熱量 : 4 または 0kW
- ・ アルゴンガス温度 : 500℃
- ・ 集合体内アルゴンガス流量 : 5.5Nm³/min
- ・ 総アルゴンガス流量 : 7.0Nm³/min
- ・ アルゴンガス流速 : 16Nm/s
- ・ 予熱時間 : 85~100 分 (4kW 発熱)、160 分 (発熱なし)
- ・ 洗浄時間 : 20 分
- ・ 洗浄槽下部ヒータ温度 : 600℃

高温アルゴンガス洗浄試験結果を付表 2.3.2-1 にまとめる。各ケースのアルゴンガス温度の履歴を付図 2.3.2-1~6 に示す。集合体の予熱はアルゴンガスにより行い、ラップ管入口のアルゴンガス温度が約 500℃に達した時点で予熱を完了とみなした。

高温洗浄試験ケース 1 の洗浄後のナトリウム付着状況を付図 2.3.2-7 に示す。ラップ管内外面および燃料ピンバンドル部にはほとんどナトリウム付着は観察されなかった。ただし、ピン下端部およびエントランスノズル部には若干の塊状のナトリウム付着が観察された。他のケースにおいても付着状況は類似している。

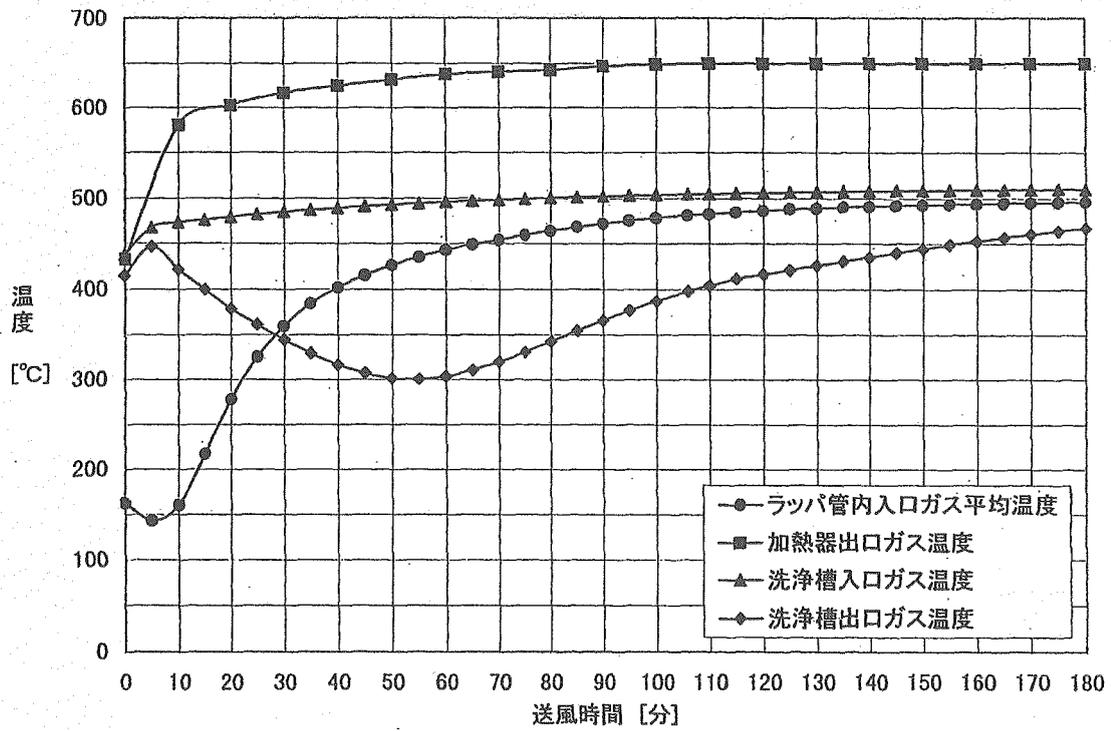
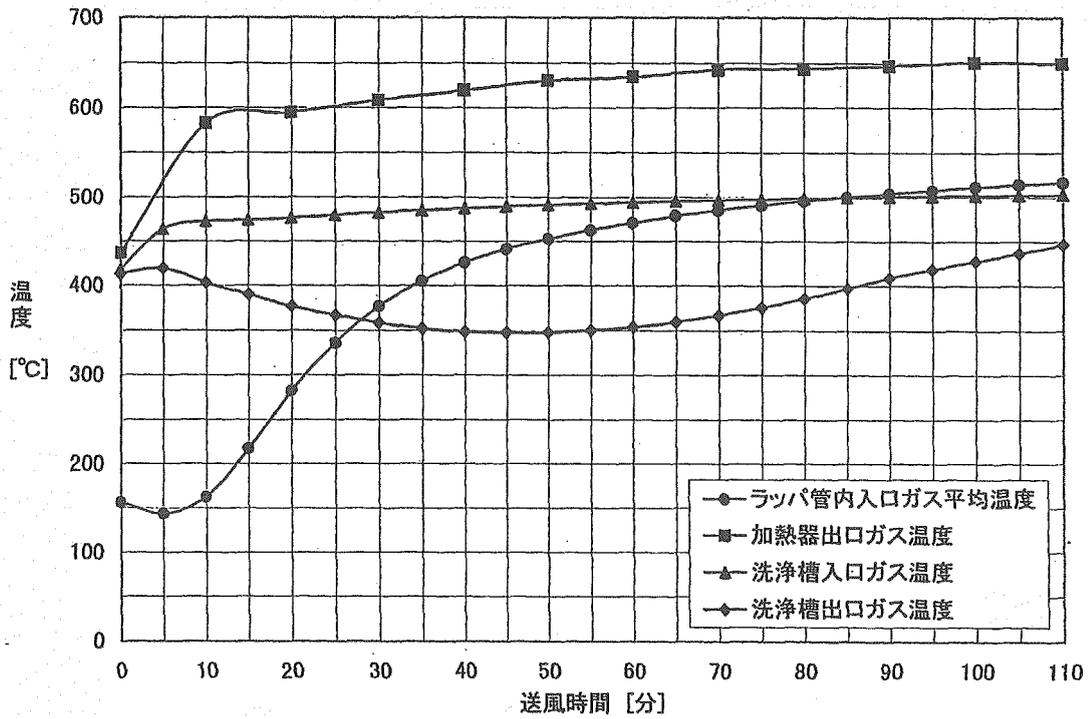
試験は集合体発熱量をパラメータとして 1、4、6 ケースは集合体発熱量 4kW で試験を実施した。この時のナトリウム残留量は 79、115、78g であり平均値は 91g と評価された。ナトリウム初期付着量を初期ナトリウム付着量確認試験の結果から 329g とすると洗浄率は 72%と評価される。

試験ケースのうち 2、3、5 ケースは燃料部分の発熱がないケースとなっている。この時のナトリウム残留量は 121、109、114 であり平均値は 115g と評価される。洗浄率は 65%と発熱があるケースと比較して低下した。燃料部分の発熱がないケースでは予熱時間を 160 分としているため、アルゴンガスが通過する時間が長い、洗浄率は低下している。このことはアルゴンガスの通過時間より、温度の影響が大きいことを示している。

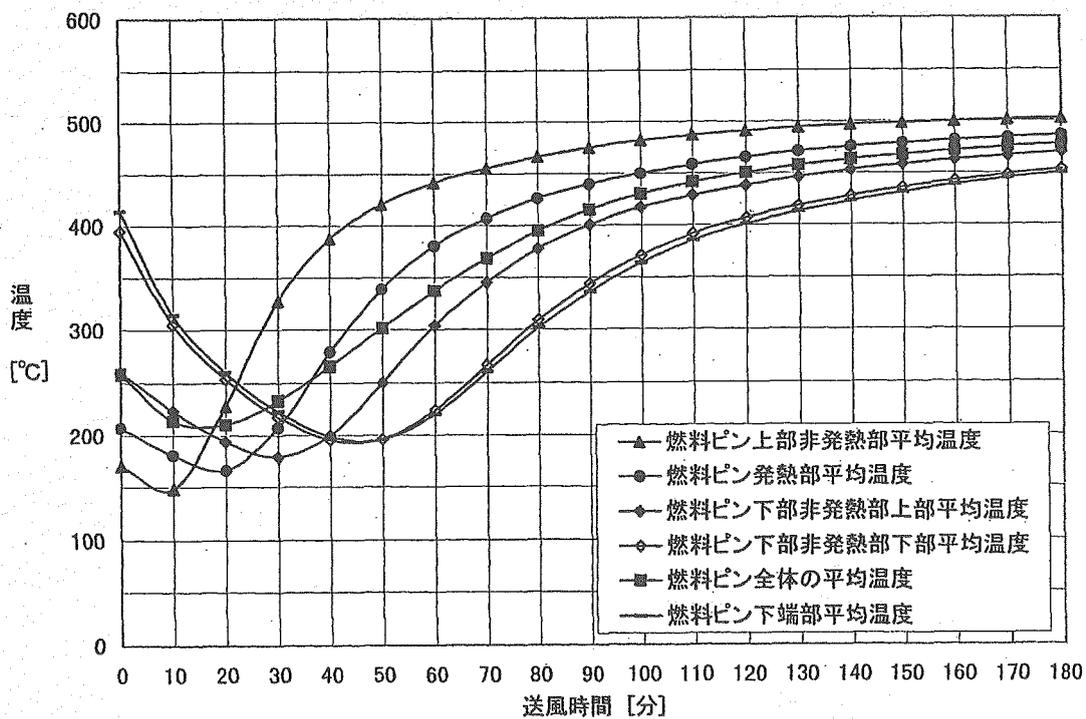
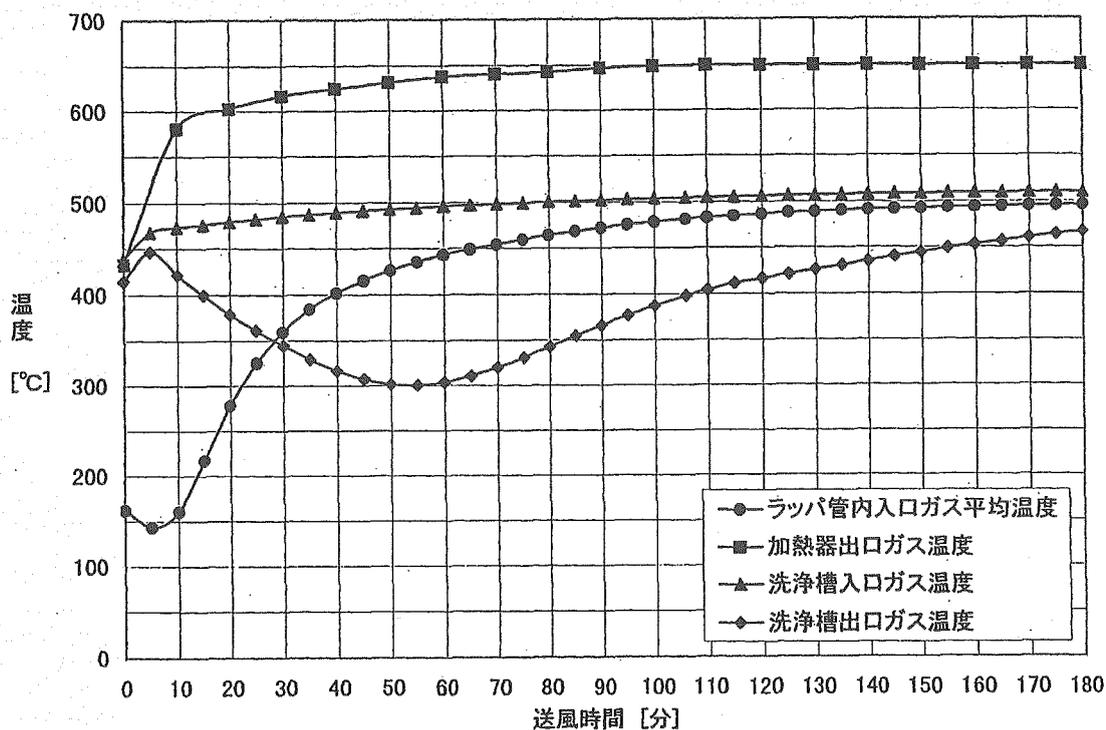
上記の結果から集合体発熱量が低い場合の方が洗浄条件として厳しいことが明らかになった。集合体発熱量なし、アルゴンガス温度 500℃、流量 5.5Nm³/min の場合において高温ガス洗浄の洗浄率は平均で 65%と評価された。

付表2.3.2-1 高温アルゴンガス洗浄試験結果のまとめ

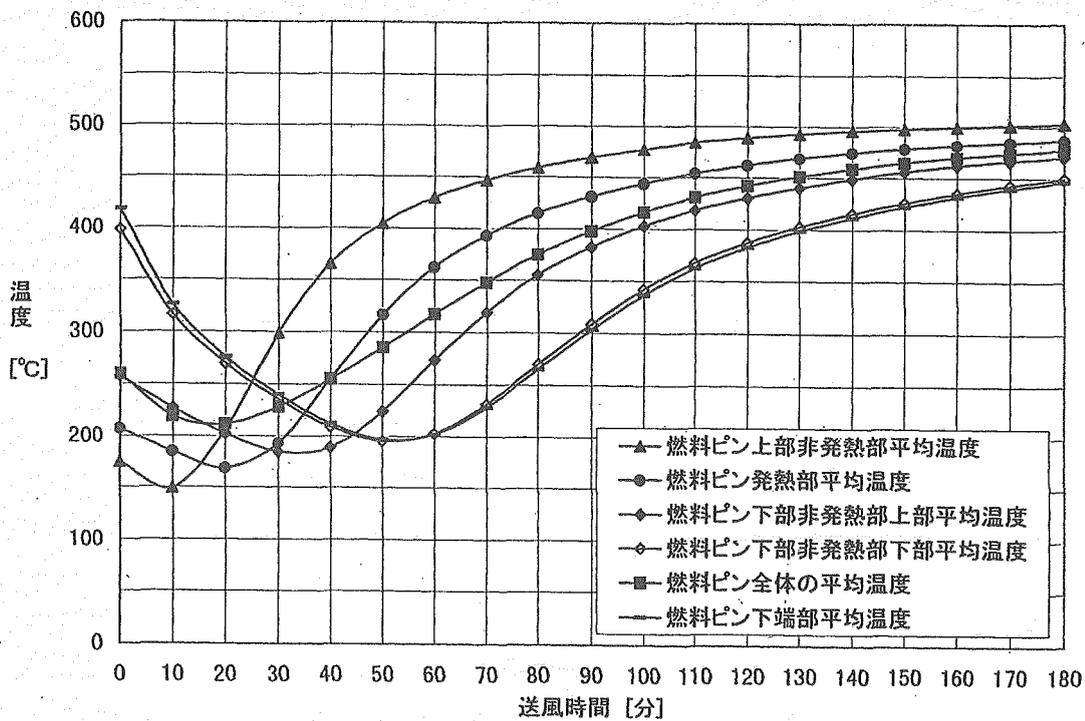
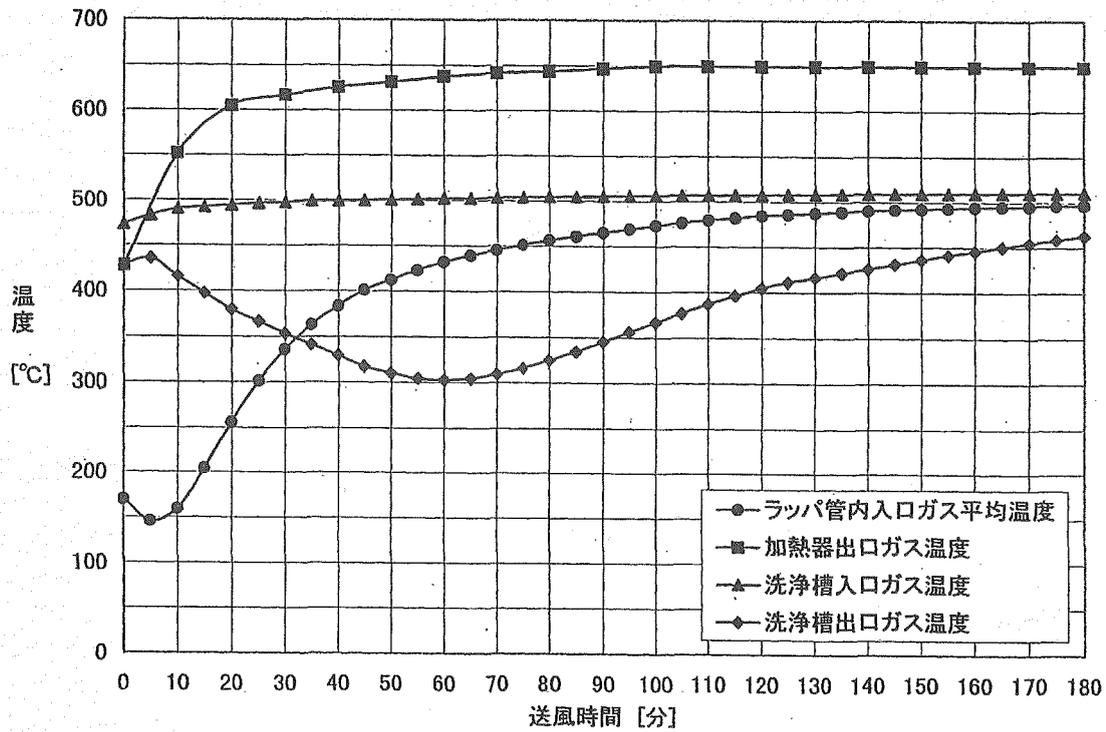
大項目	項目	単位	ケース1	ケース4	ケース6	ケース2	ケース3	ケース5
試験条件	発熱量	kW	4	4	4	0	0	0
	ナトリウム浸漬前温度(燃料ビン平均)	°C	522	531	499	534	533	491
	ナトリウム温度	°C	200	200	200	200	200	200
	アルゴンガス温度	°C	500	500	500	500	500	500
	アルゴンガス流量(有効)	Nm3	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
	アルゴンガス流量(全体)	Nm3	7	7	7	7	7	7
	アルゴンガス送風時間(予熱)	min	90	85	100	160	160	160
	アルゴンガス送風時間(洗浄)	min	20	20	20	20	20	20
	洗浄槽下部ヒータ設定温度	°C	600	600	600	600	600	600
	予熱開始 温度	燃料ビン発熱部最高温度	°C	225	225	220	230	225
燃料ビン平均温度		°C	250	253	248	259	260	245
ラツパ管入口ガス温度		°C	157	160	151	162	171	145
燃料ビン発熱部最高温度		°C	610	585	605	515	510	510
燃料ビン平均温度		°C	489	491	505	472	470	469
ラツパ管入口ガス温度		°C	504	497	501	494	495	494
燃料ビン発熱部最高温度		°C	635	610	625	515	515	515
燃料ビン平均温度		°C	527	520	531	478	478	476
ラツパ管入口ガス温度		°C	517	509	511	496	497	497
ナトリウム 付着量		ピン下端、エントランスノズル部	g	23				
	その他	g	42	93	62	98	90	95
	不明	g	14	22	16	23	19	19
	合計	g	79	115	78	121	109	114
	平均±(90%信頼度幅)	g	91 ±36			115 ±10		
	洗浄率	%	72			65		



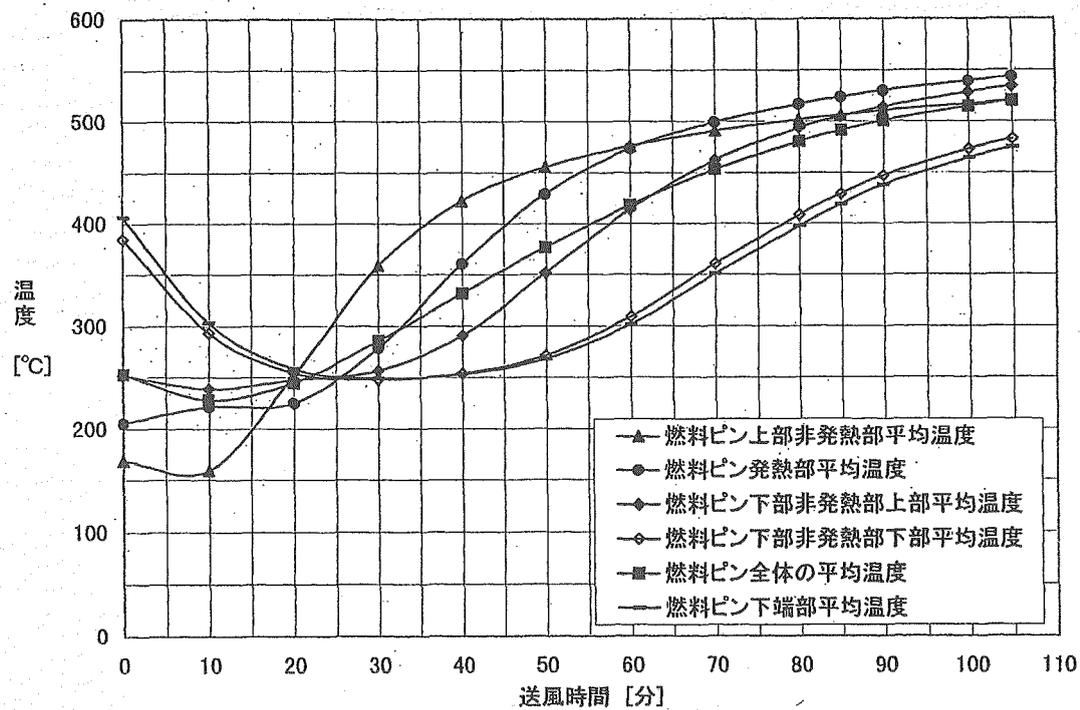
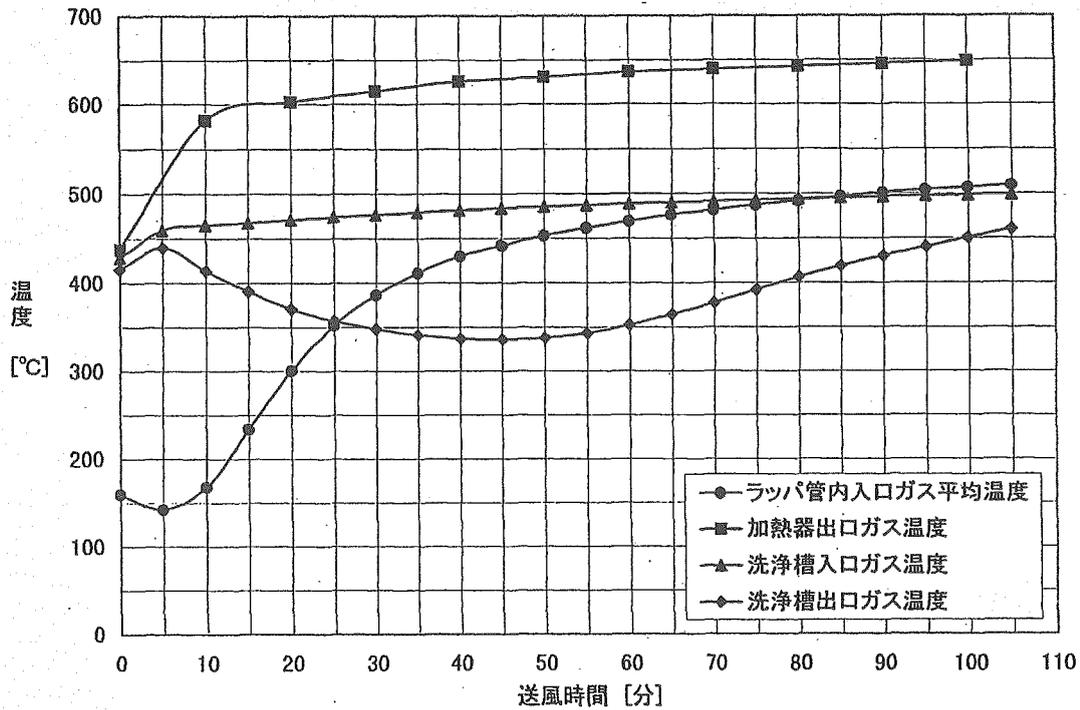
付図 2.3.2-1 高温洗浄試験の温度履歴 (ケース 1)



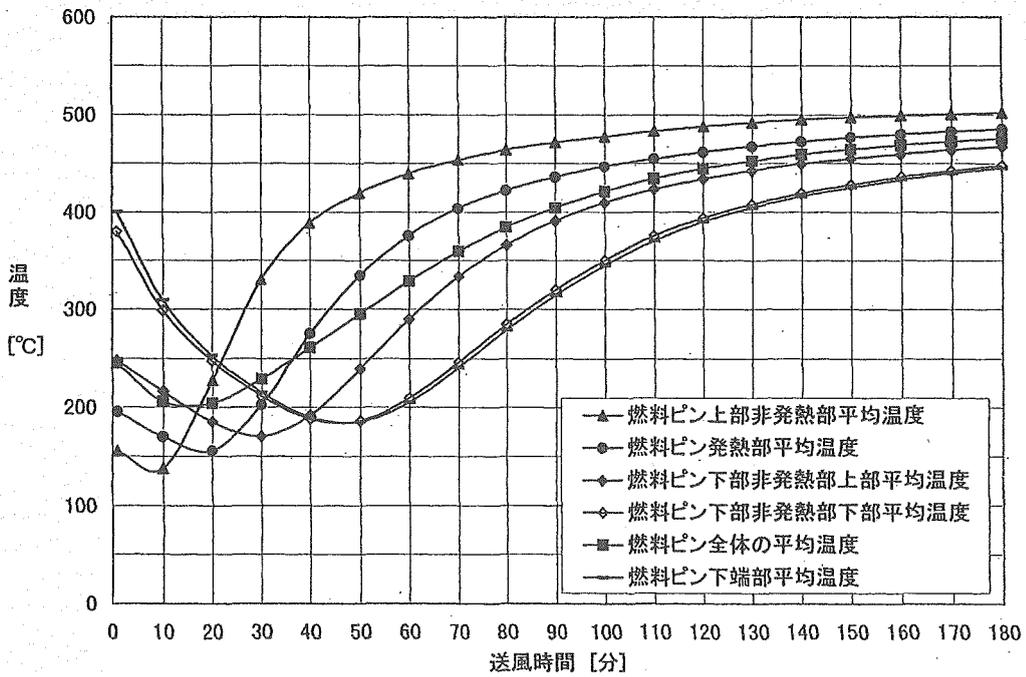
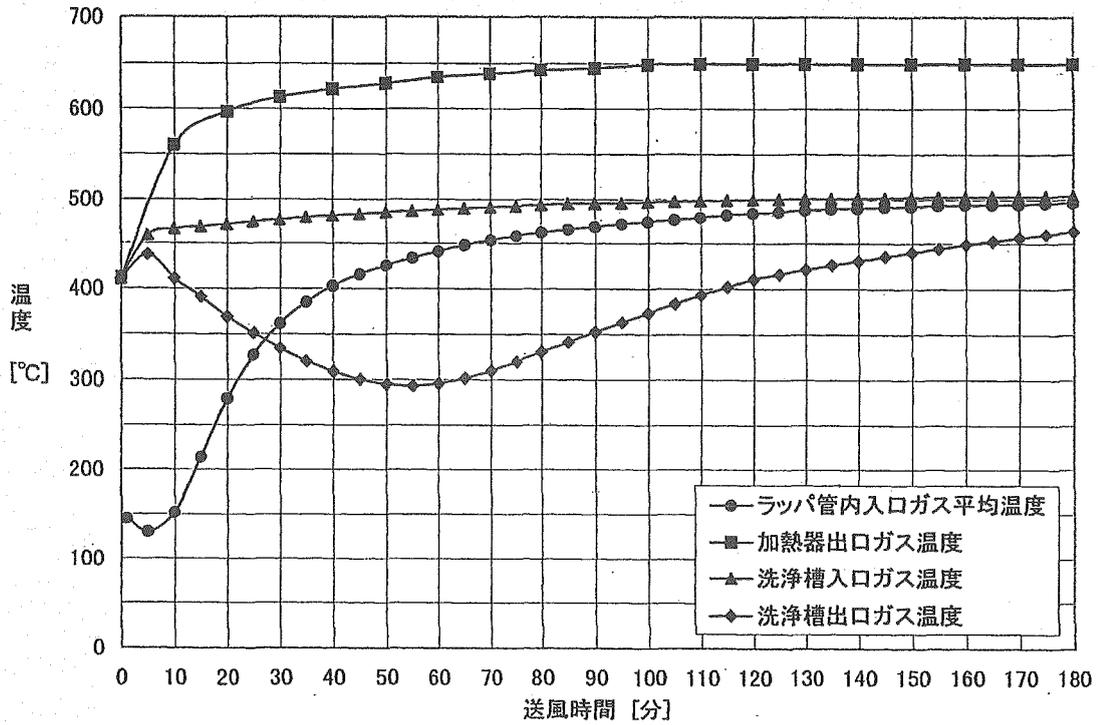
付図 2.3.2-2 高温洗浄試験の温度履歴 (ケース 2)



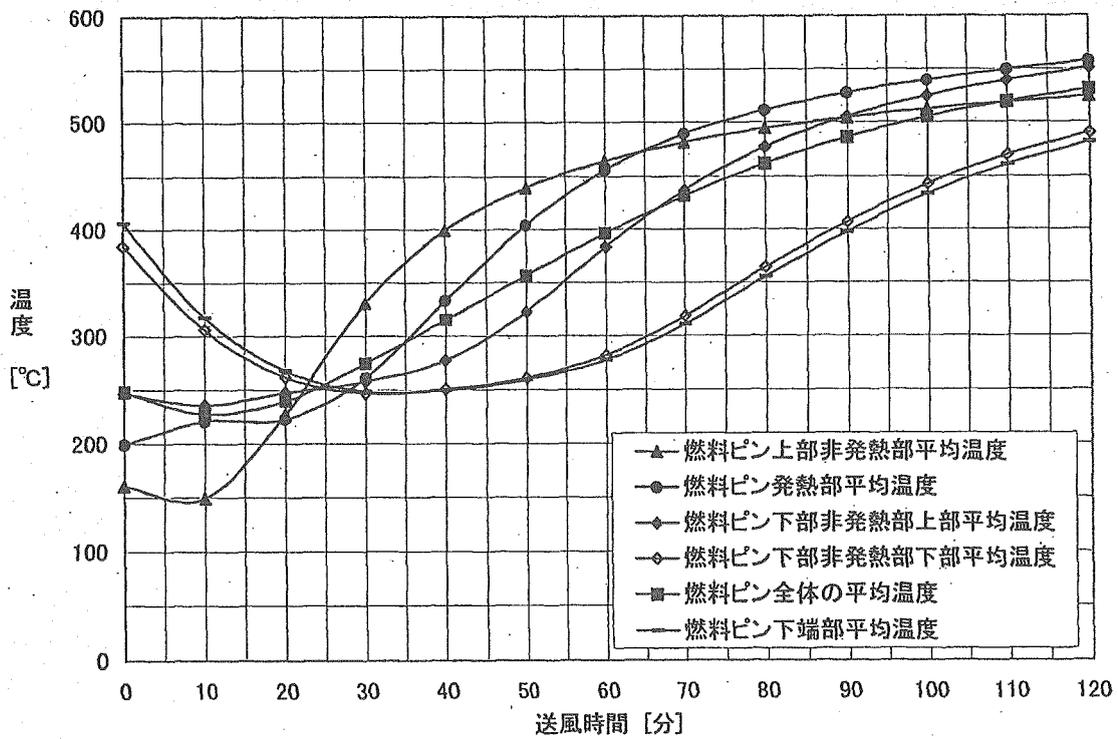
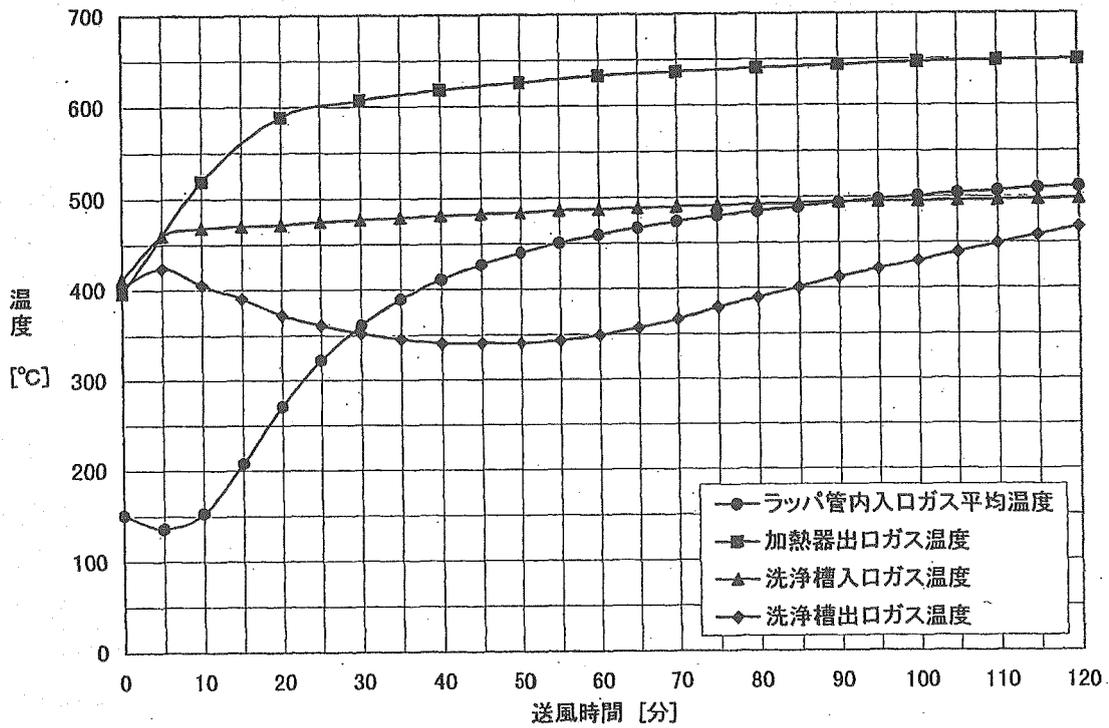
付図 2.3.2-3 高温洗浄試験の温度履歴 (ケース 3)



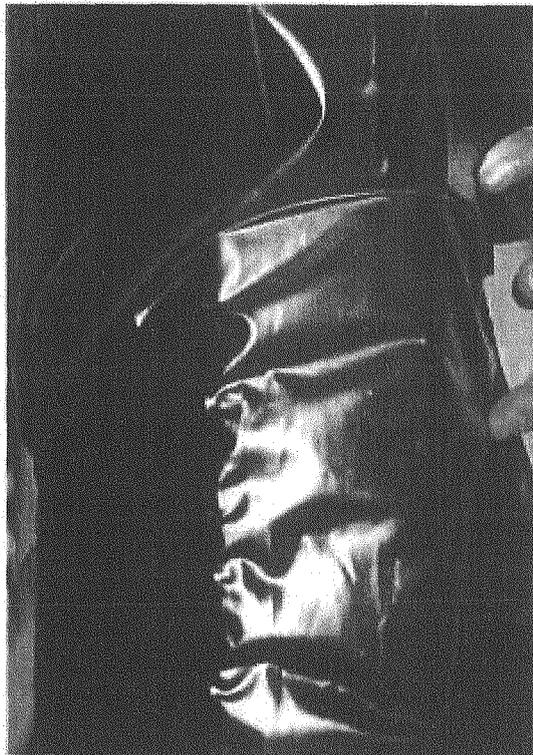
付図 2.3.2-4 高温洗浄試験の温度履歴 (ケース 4)



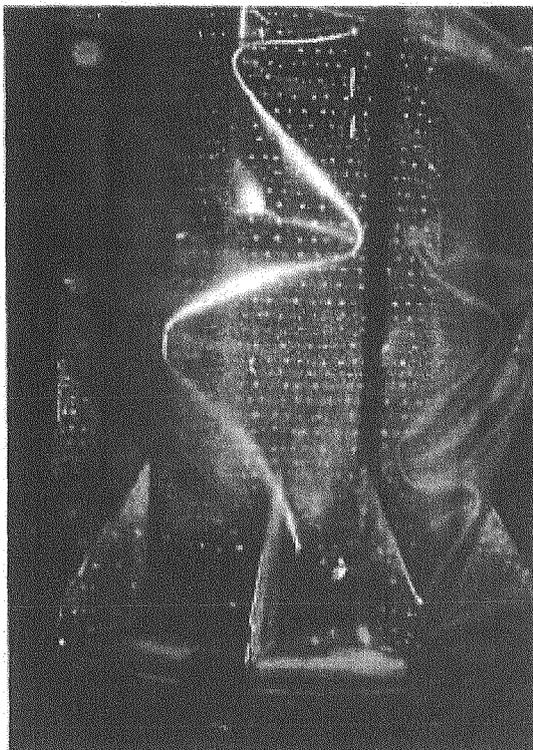
付図 2.3.2-5 高温洗浄試験の温度履歴 (ケース 5)



付図 2.3.2-6 高温洗浄試験の温度履歴 (ケース 6)

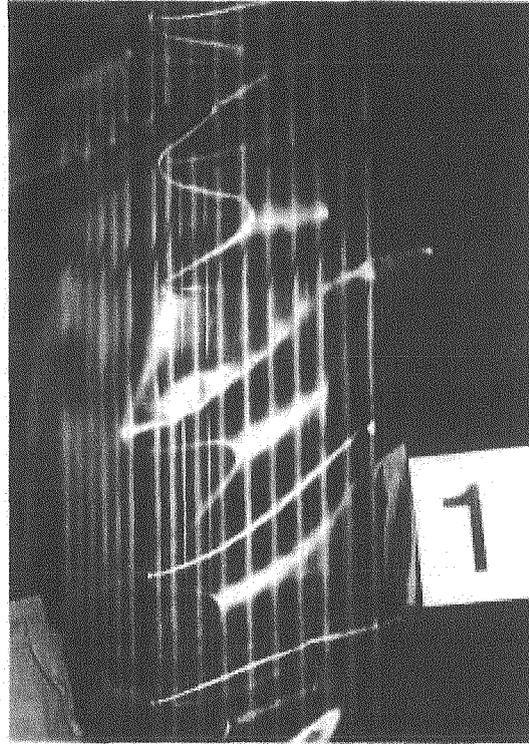


(ラップ管上部)

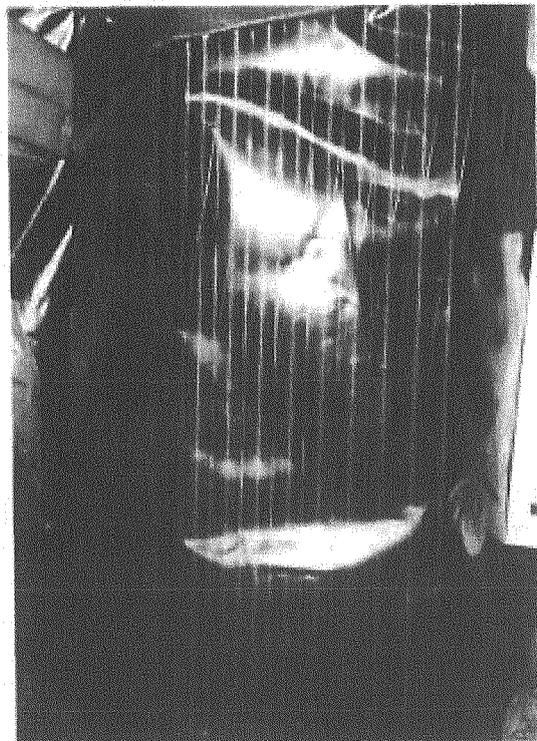


(ラップ管下部)

付図 2.3.2-7 (1/3) 高温洗浄試験のナトリウム付着状況 (ケース 1)

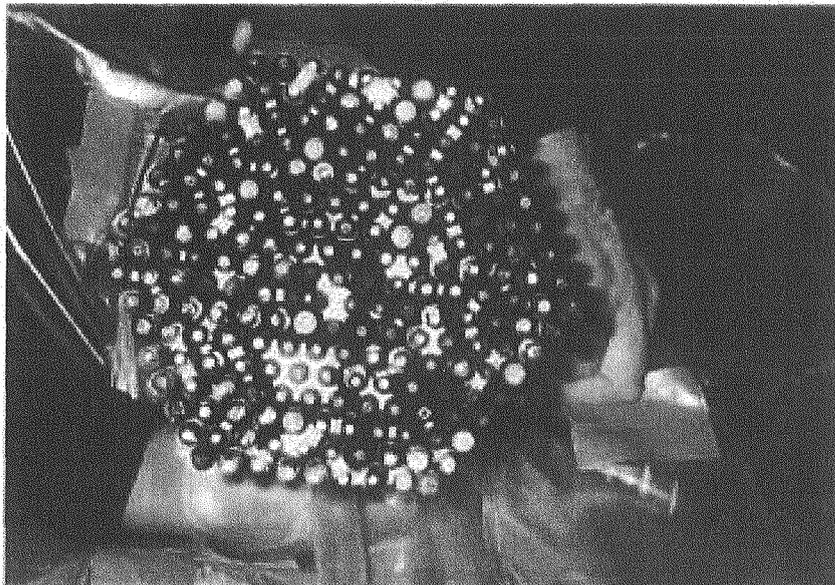


(ピンバンドル上部)

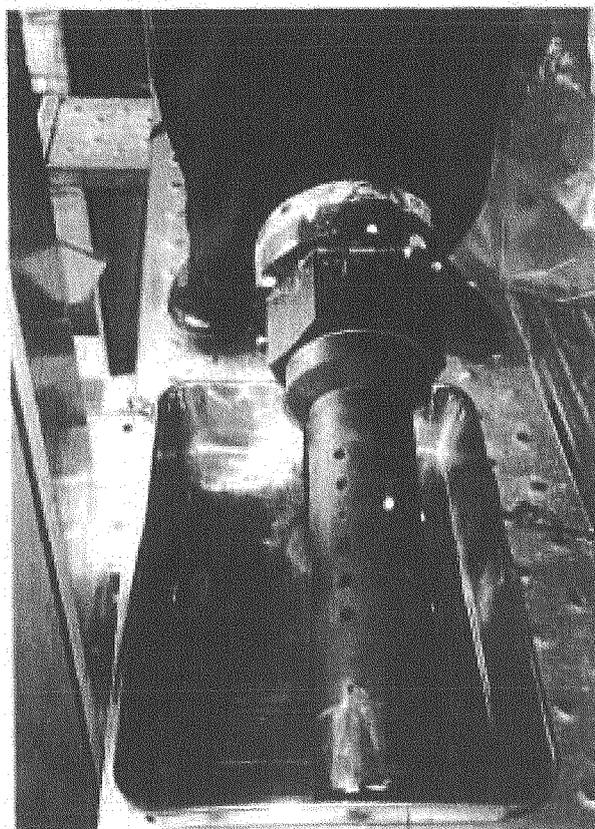


(ピンバンドル下部)

付図 2. 3. 2-7 (2/3) 高温洗浄試験のナトリウム付着状況 (ケース 1)



(ピンバンドル下端)



(エントランスノズル部)

付図 2.3.2-7 (3/3) 高温洗浄試験のナトリウム付着状況 (ケース 1)

付 2.3.3 中温アルゴンガス洗浄試験

中温のアルゴンガスによる模擬燃料集合体洗浄試験の試験条件を下記に示す。

- ・ 集合体発熱量 : 4 または 0kW
- ・ アルゴンガス温度 : 300℃
- ・ 集合体内アルゴンガス流量 : 2.0 または 3.5Nm³/min
- ・ 総アルゴンガス流量 : 7.0Nm³/min
- ・ アルゴンガス流速 : 6 または 10Nm/s
- ・ 予熱時間 : 0～88 分
- ・ 洗浄時間 : 20 分
- ・ 洗浄槽下部ヒータ温度 : ヒータなし、250、600℃

中温アルゴンガス洗浄試験結果を付表 2.3.3-1 にまとめる。各ケースのアルゴンガス温度の履歴を付図 2.3.3-1～9 に示す。ケース 1 を除く各ケースにおいては集合体の予熱はアルゴンガスにより行い、ラップ管入口のアルゴンガス温度が約 300℃に達した時点で予熱を完了とみなした。

中温洗浄試験ケース 1 の洗浄後のナトリウム付着状況を付図 2.3.3-10 に示す。ラップ管内外面および燃料ピンバンドル部にはほとんどナトリウム付着は観察されなかった。ただし、ピン下端部およびエントランスノズル部には若干の塊状のナトリウム付着が観察された。他のケースにおいても付着状況は類似している。

ケース 1 は洗浄槽下部ヒータ加熱なし、予熱なし、燃料部発熱なしの条件で試験を実施した。このときのナトリウム残留量は 220g となっており、ナトリウム洗浄率は 33%と評価された。

ケース 2 から 4 については、洗浄槽下部のヒータ設定温度を 250℃、予熱時間 50 分、燃料部発熱量 4kW として実施した。このときのナトリウム残留量は平均で 211g となっており、洗浄率は 36%と評価された。

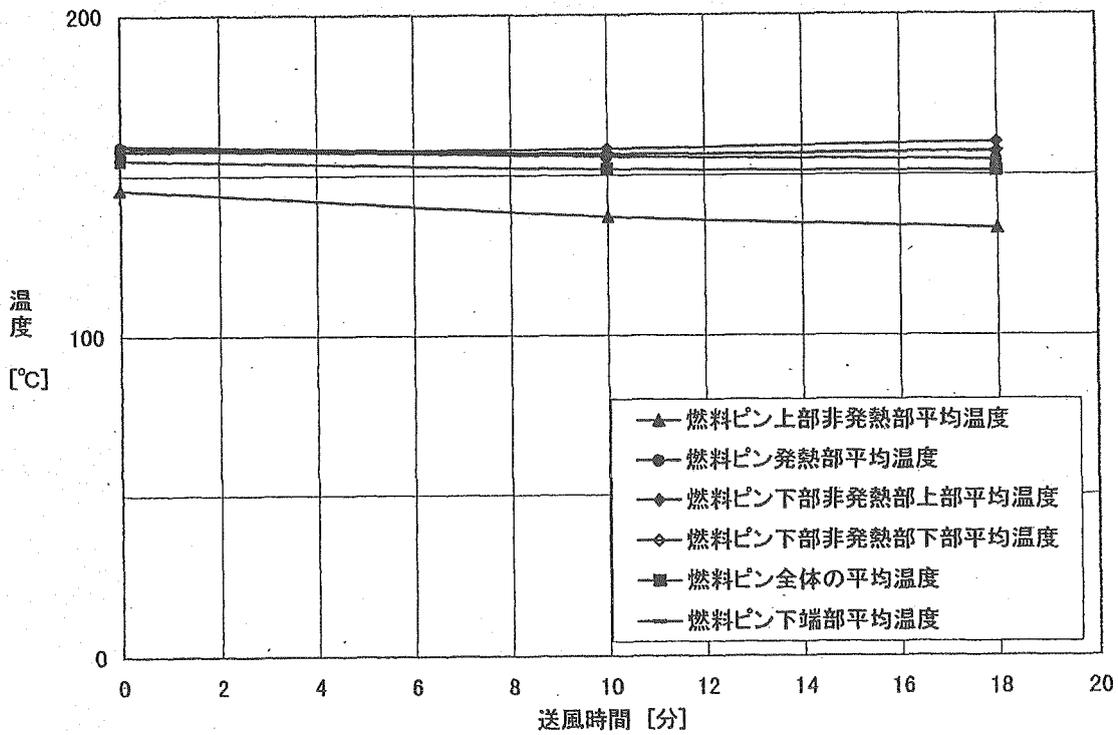
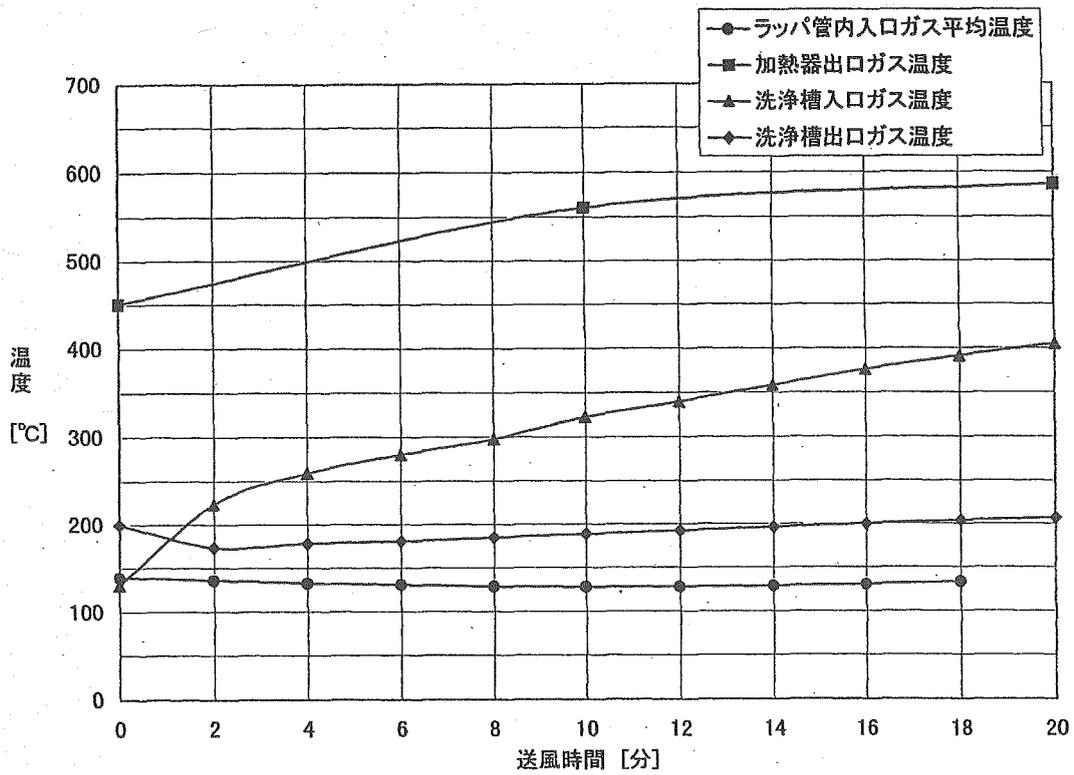
ケース 5、6 については洗浄槽下部のヒータ設定温度設定温度を 600℃、予熱時間 50 分、燃料部発熱量 4kW として実施した。ただし、ケース 5 については試験開始後 43 分および 88 分にアルゴンガス供給を一時停止している。ナトリウム残留量は平均で 177g、洗浄率は 46%と評価された。

ケース 7 から 9 については、洗浄槽下部のヒータ設定温度を 600℃、予熱時間 60 分、燃料部発熱なしとして実施した。このときのナトリウム残留量は平均で 182g となっており、洗浄率は 45%と評価された。

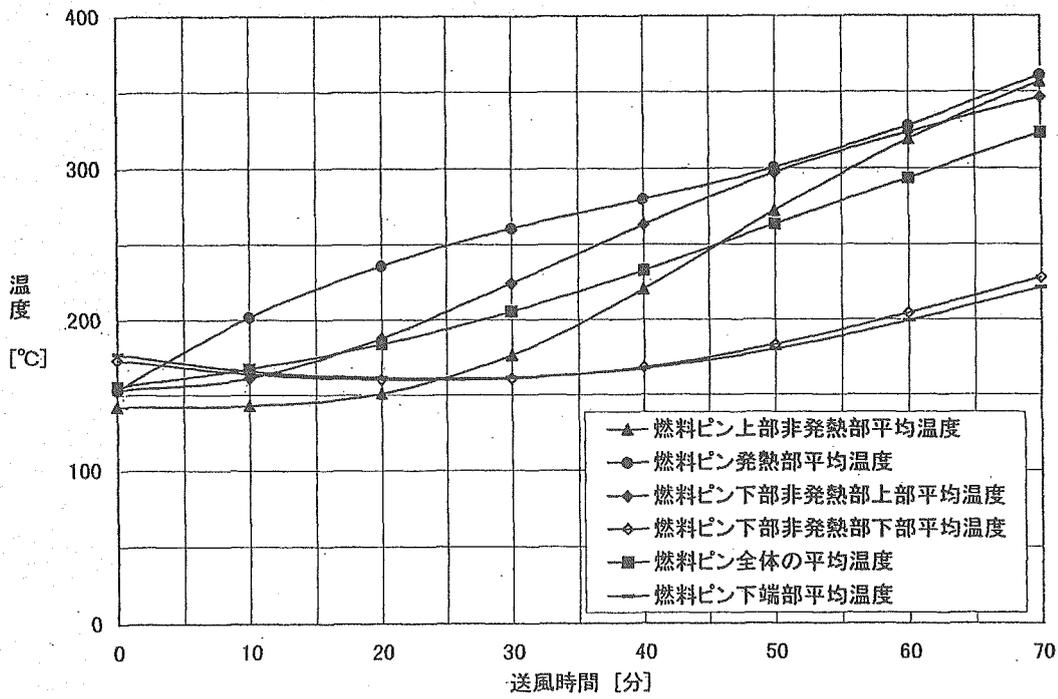
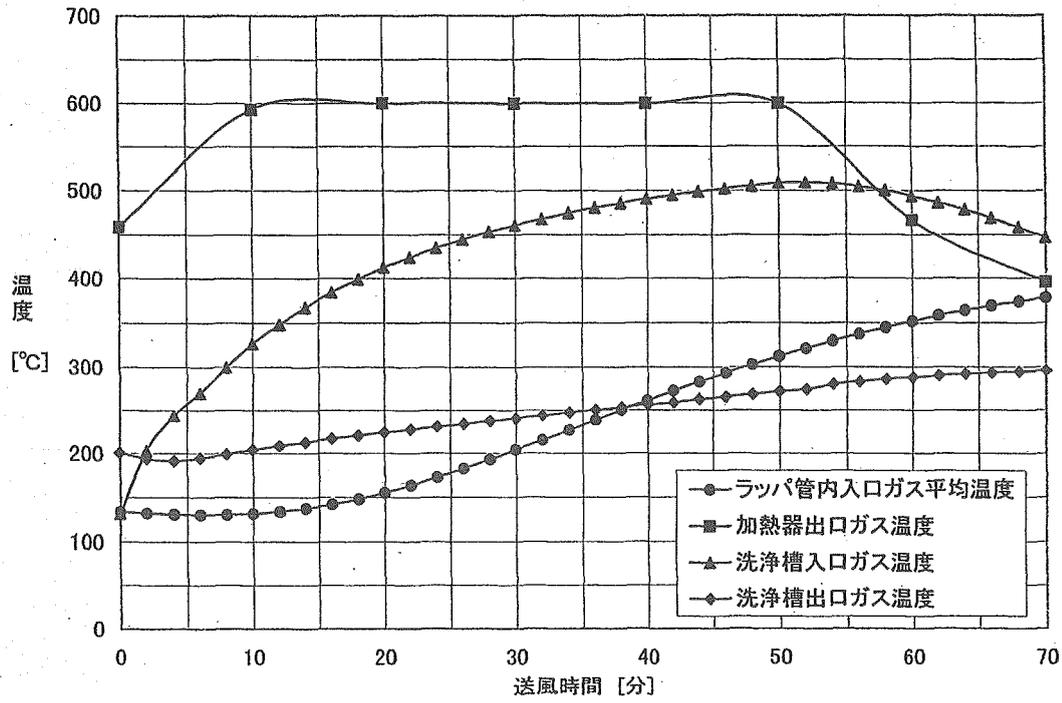
上記の結果から、洗浄槽下部のヒータ温度は洗浄率に対して影響が大きく、600℃程度に設定する必要があることが明らかになった。また、集合体発熱量なし、アルゴンガス温度 300℃、流量 2Nm³/min において平均洗浄性能 45%と評価された。

付表2.3.3-1 中温アルゴンガス洗浄試験結果のまとめ

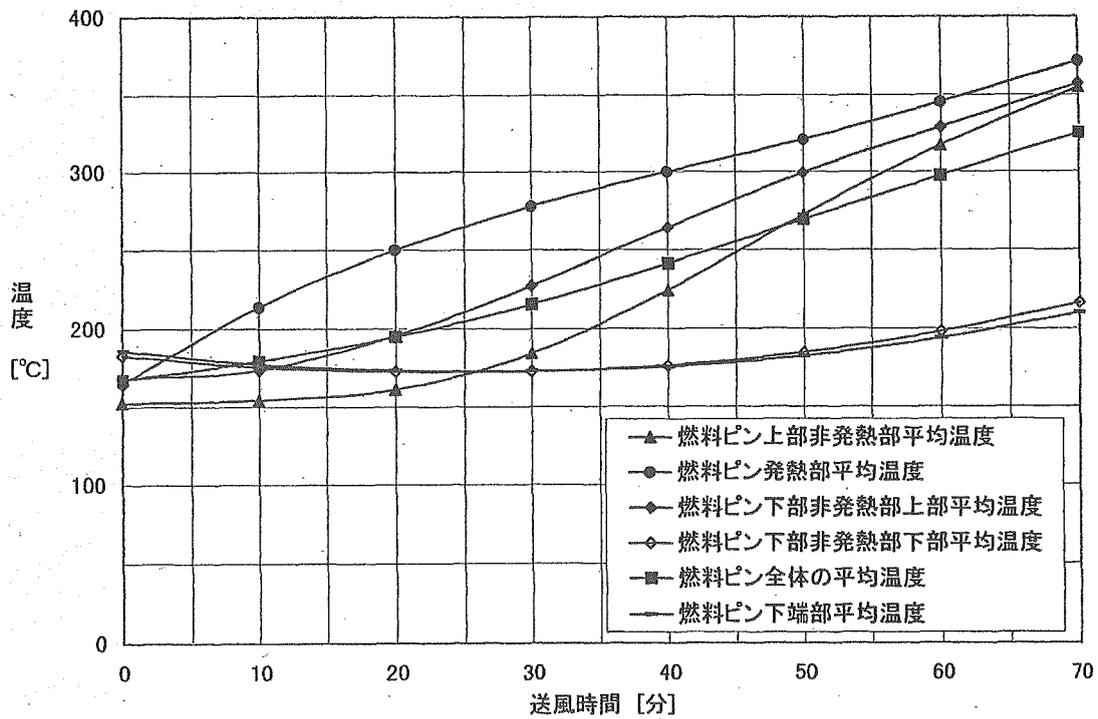
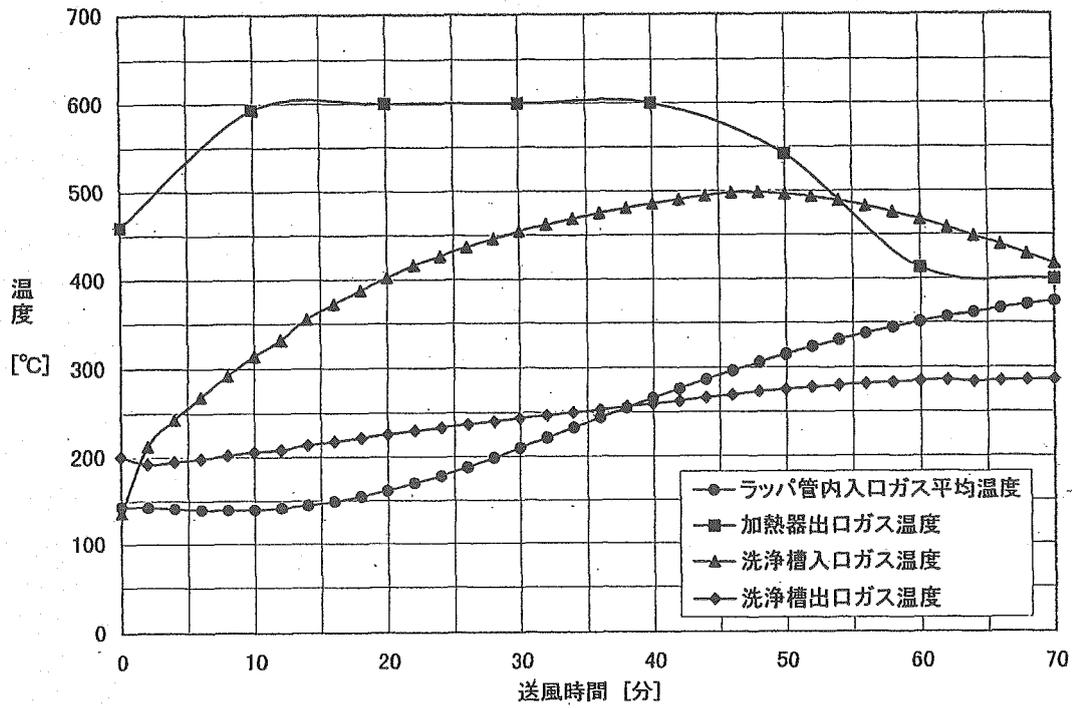
大項目	項目	単位	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7	ケース8	ケース9
試験条件	発熱量	kW	0	4	4	4	4	4	0	0	0
	ナトリウム浸漬前温度(燃料ピン平均)	°C	507	512	524	未取得	535	533	520	526	538
	ナトリウム温度	°C	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	アルゴンガス温度	°C	300	300	300	300	300	300	300	300	300
	アルゴンガス流量(有効)	Nm3	2	2	2	2	3.5	3.5	2	2	2
	アルゴンガス流量(全体)	Nm3	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	アルゴンガス送風時間(予熱)	min	0	50	50	50	88	35	60	60	60
	アルゴンガス送風時間(洗浄)	min	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	洗浄槽下部ヒータ設定温度	°C	予熱なし	250	250	250	600	600	600	600	600
	予熱開始温度	°C	-	160	170	170	185	200	195	215	220
予熱完了温度	燃料ピン最高温度	°C	-	156	167	166	226	235	229	245	247
	燃料ピン平均温度	°C	-	134	144	144	130	146	140	149	154
	フラツパ管入口ガス温度	°C	-	375	410	420	490	320	225	225	230
	燃料ピン最高温度	°C	165	263	270	265	373	256	209	218	222
	燃料ピン平均温度	°C	155	313	315	298	313	303	301	307	306
	フラツパ管入口ガス温度	°C	140	410	450	465	540	355	280	285	275
	燃料ピン最高温度	°C	151	323	325	316	385	307	230	237	237
	燃料ピン平均温度	°C	134	378	375	350	285	366	320	313	308
	フラツパ管入口ガス温度	°C	66	176	163	229	151	129	190	150	126
	ピン下端、エントランスノズル部	g	141	20	21	25	24	50	22	29	27
ナトリウム付着量	その他	g	13	196	183	254	175	179	212	180	153
	不明	g	220	211 ±64	177 ±13	46	182 ±50				
	合計	g	220	36							
	平均±(90%信頼度幅)	g	33								
洗浄率	%										
平均値											



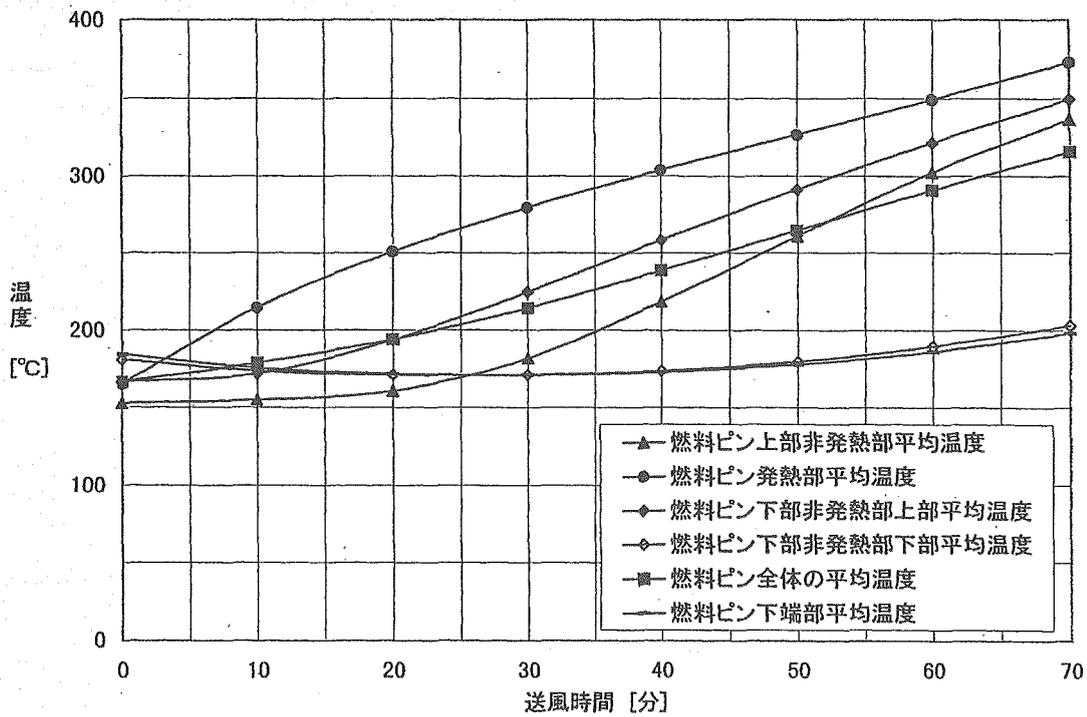
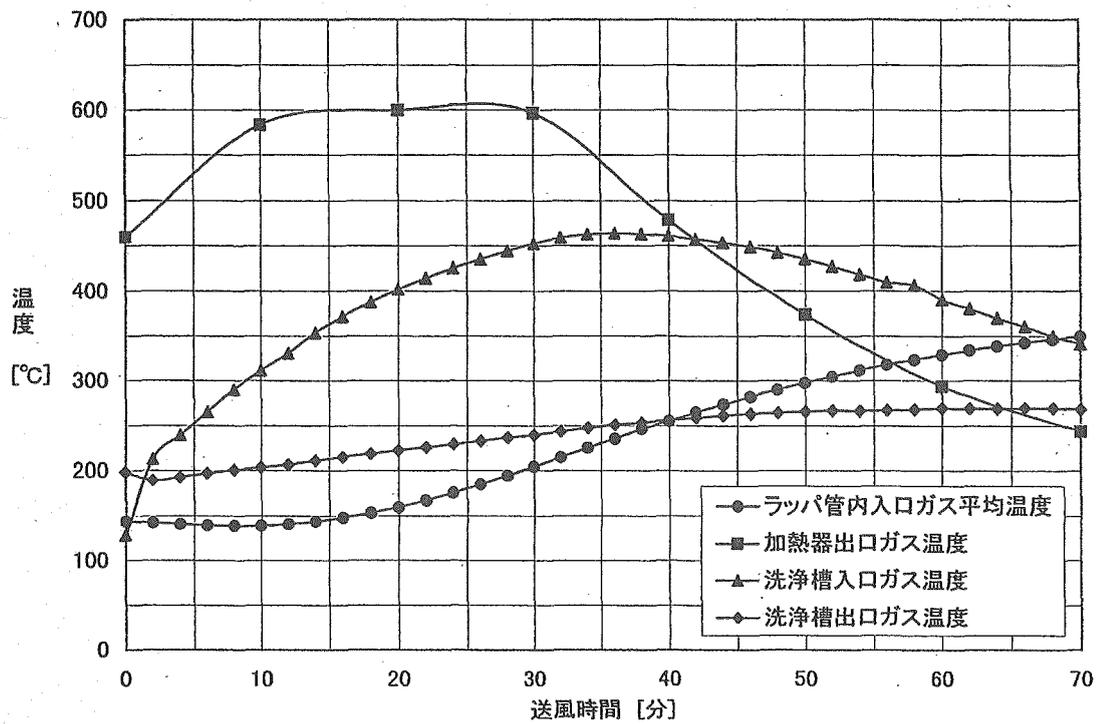
付図 2.3.3-1 中温洗淨試験の温度履歴 (ケース 1)



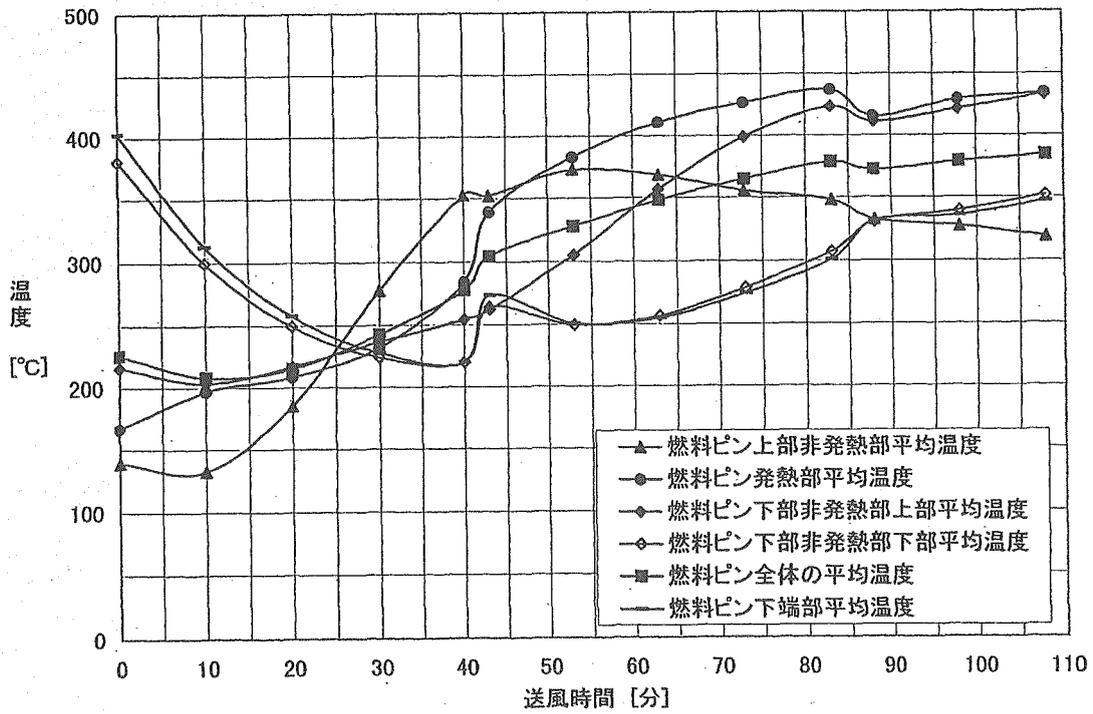
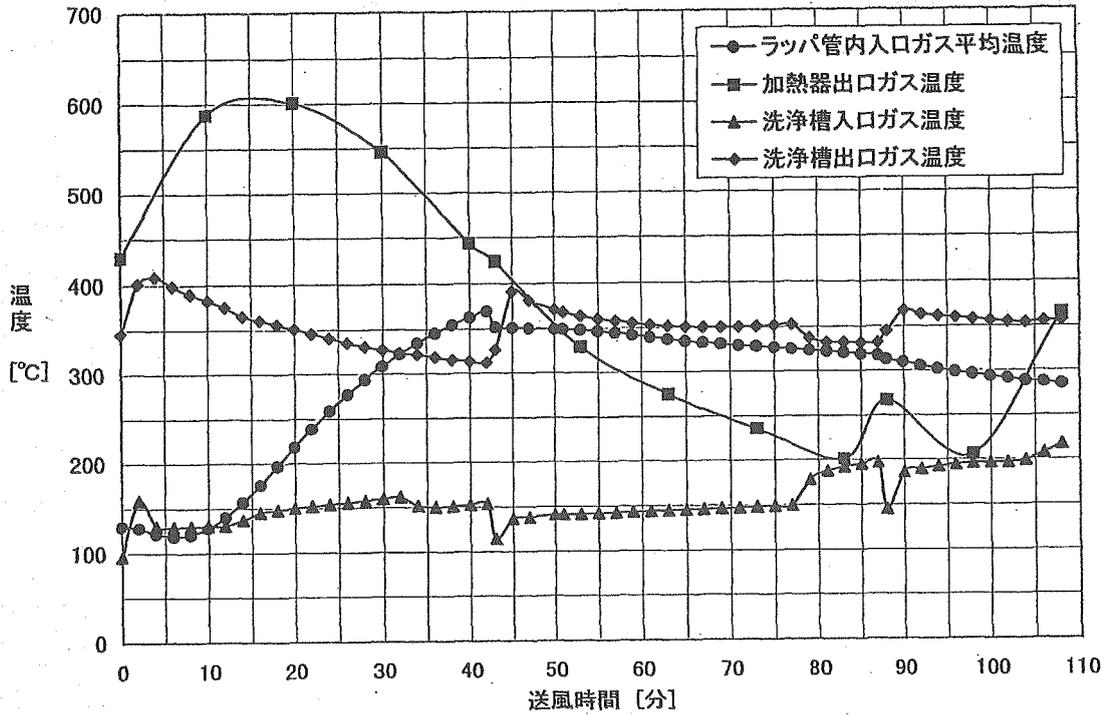
付図 2.3.3-2 中温洗浄試験の温度履歴 (ケース 2)



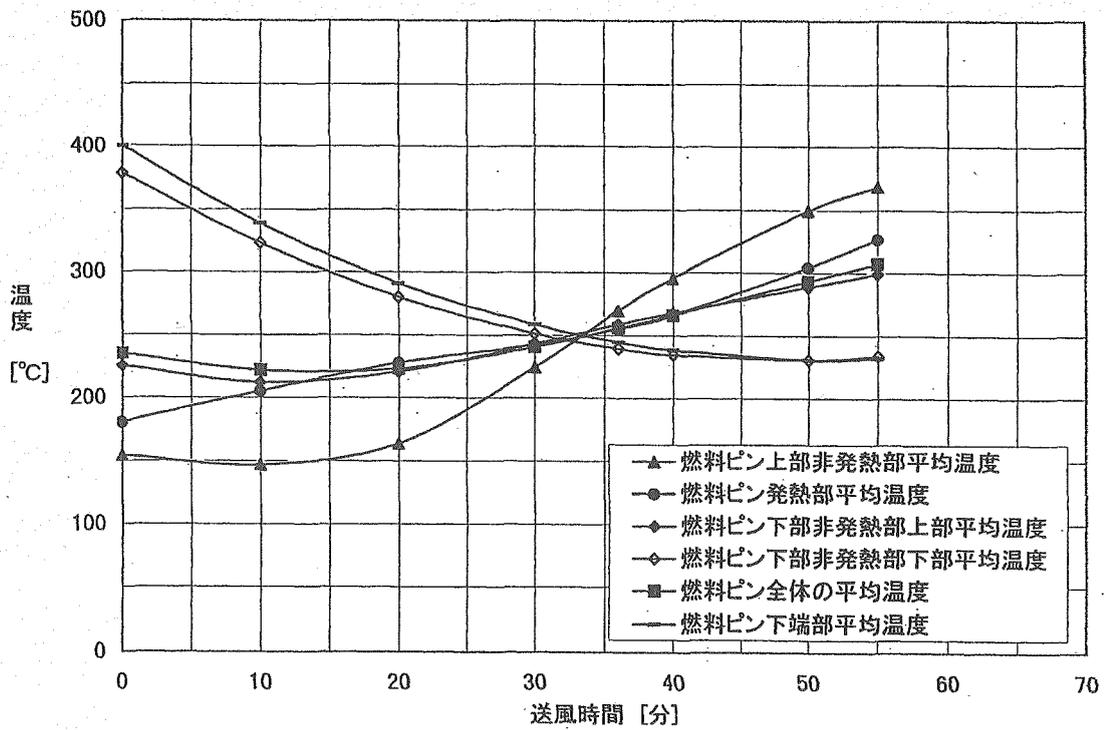
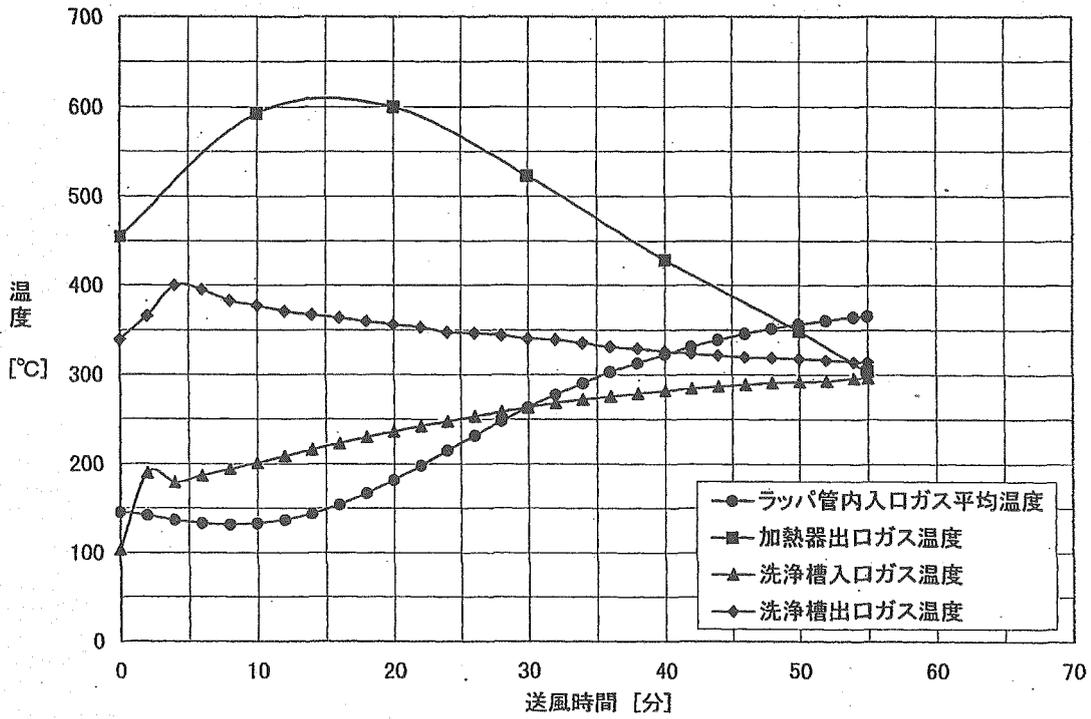
付図 2.3.3-3 中温洗浄試験の温度履歴 (ケース 3)



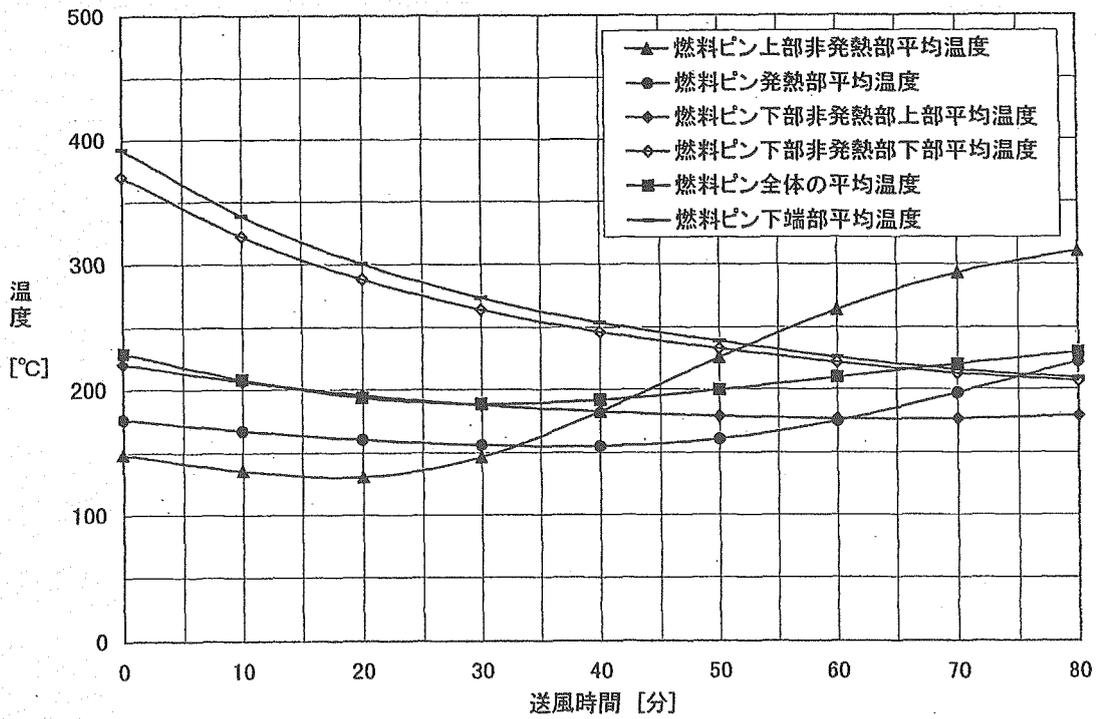
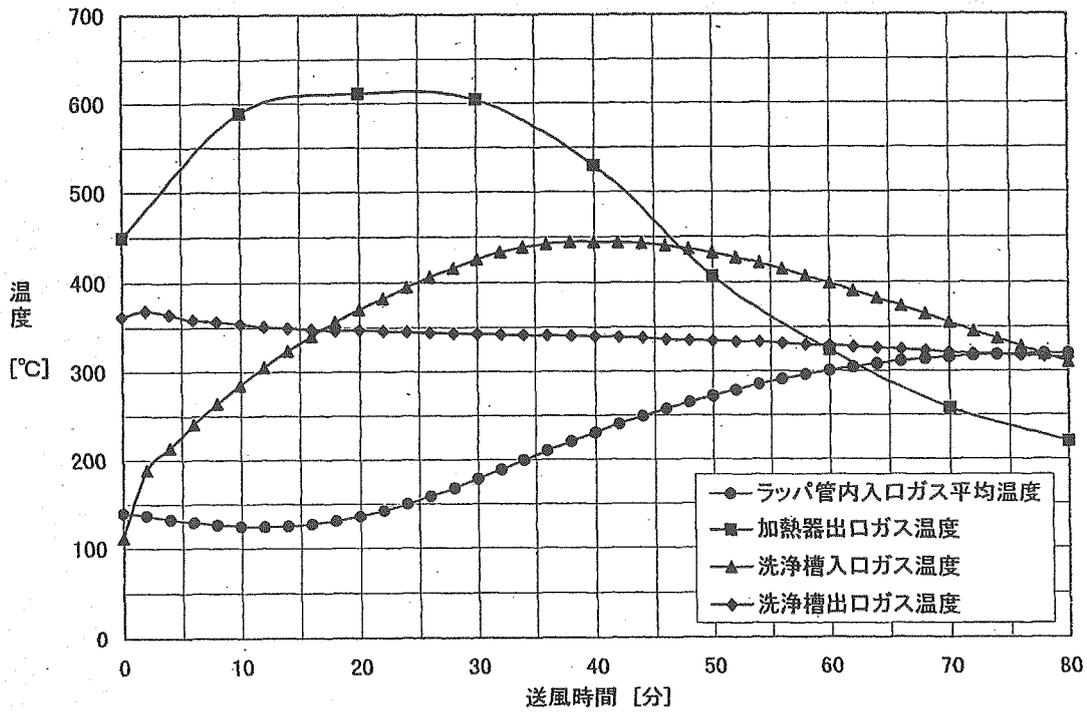
付図 2.3.3-4 中温洗浄試験の温度履歴 (ケース 4)



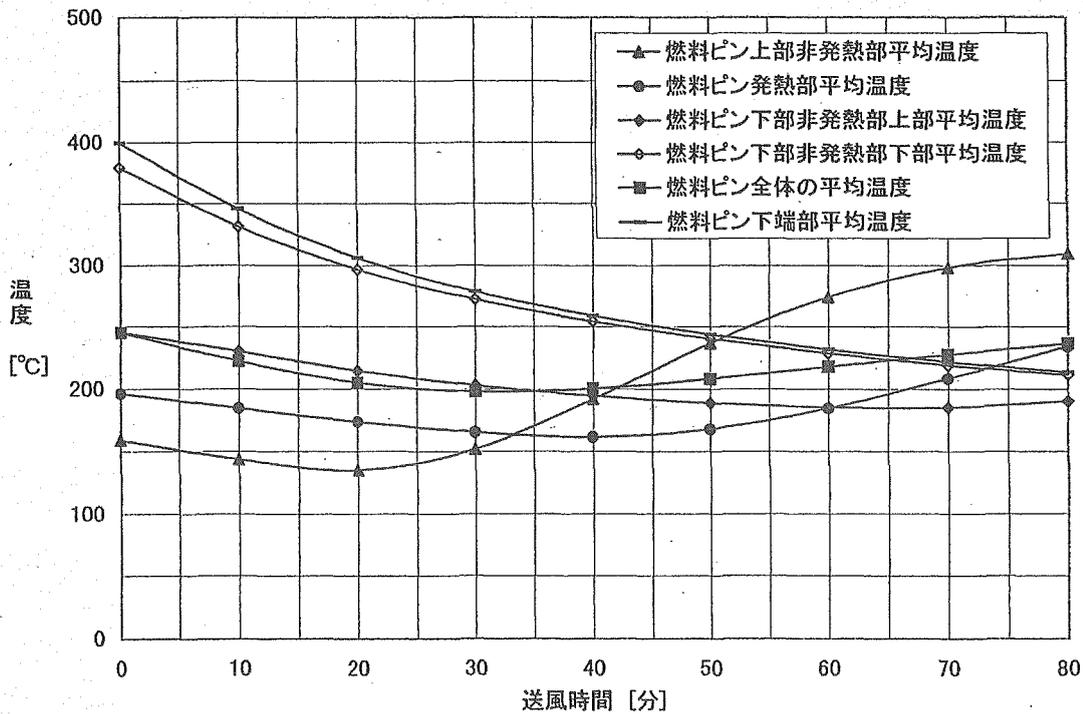
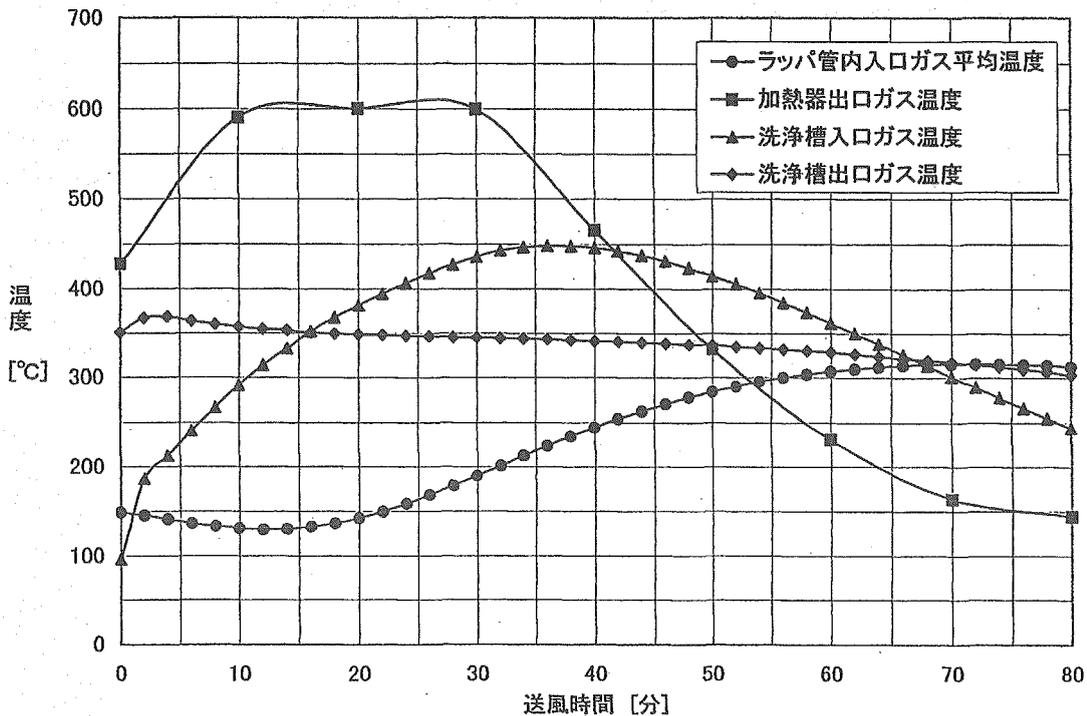
付図 2.3.3-5 中温洗浄試験の温度履歴 (ケース 5)



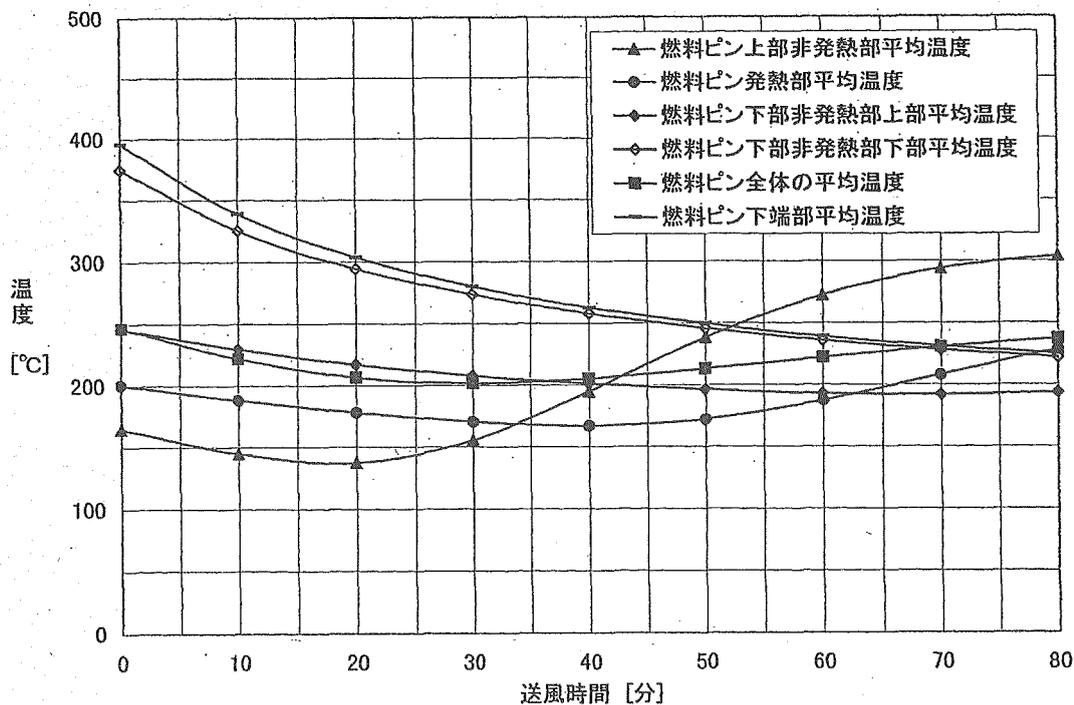
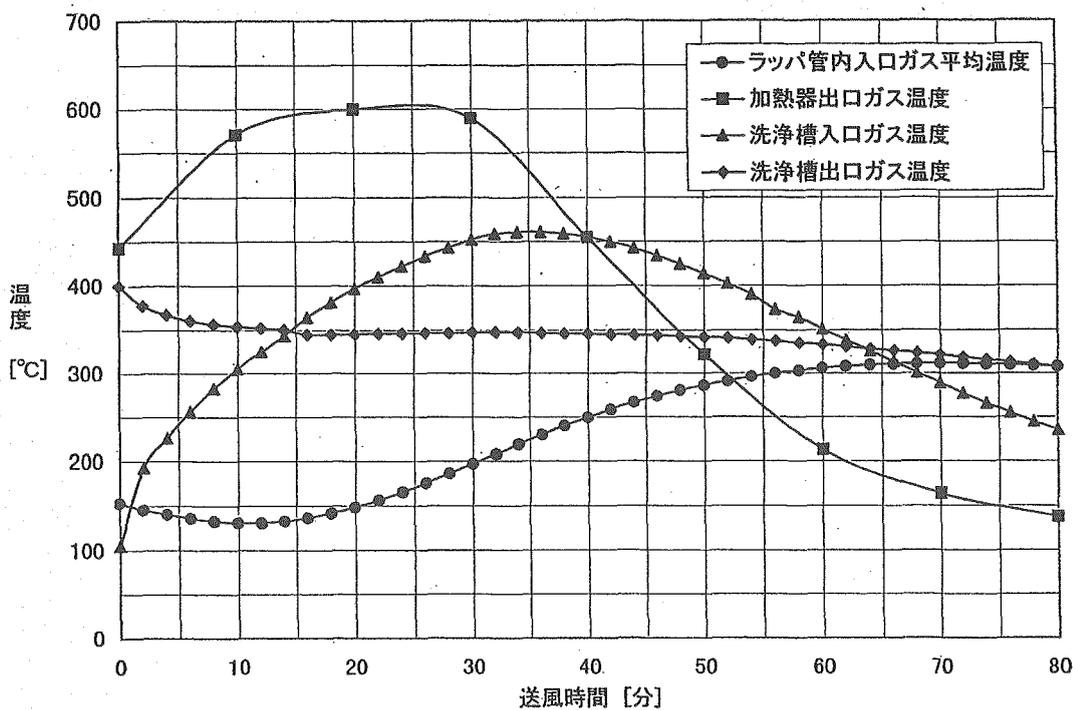
付図 2.3.3-6 中温洗浄試験の温度履歴 (ケース 6)



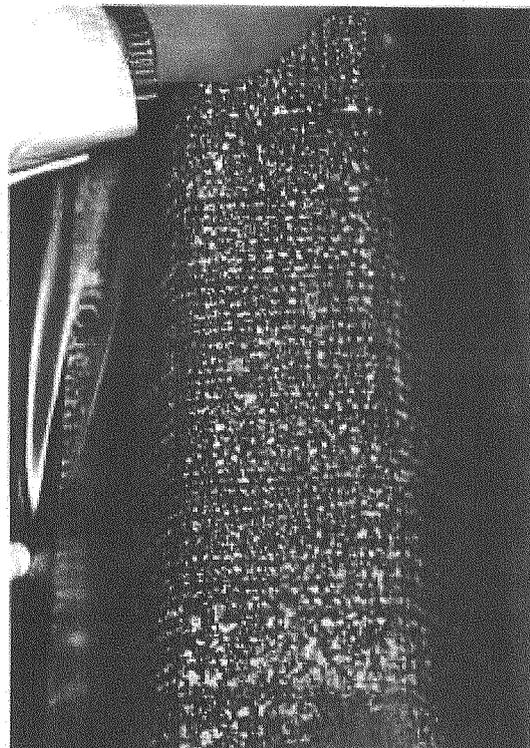
付図 2.3.3-7 中温洗浄試験の温度履歴 (ケース 7)



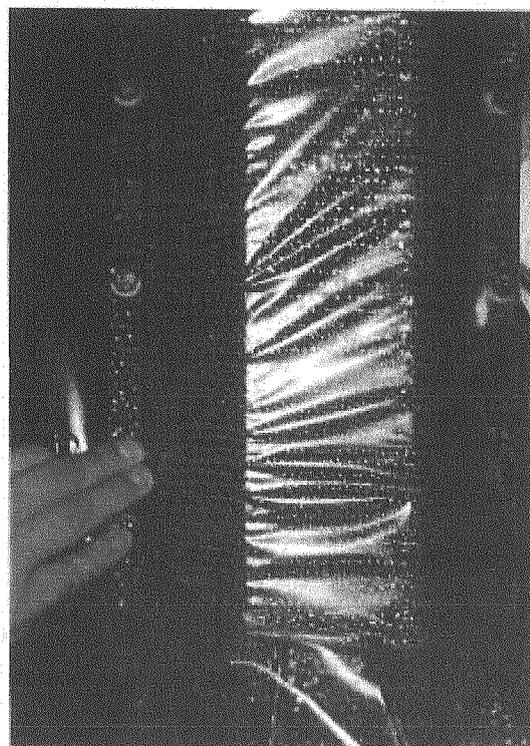
付図 2.3.3-8 中温洗浄試験の温度履歴 (ケース 8)



付図 2.3.3-9 中温洗浄試験の温度履歴 (ケース 9)



(ラッパ管上部)

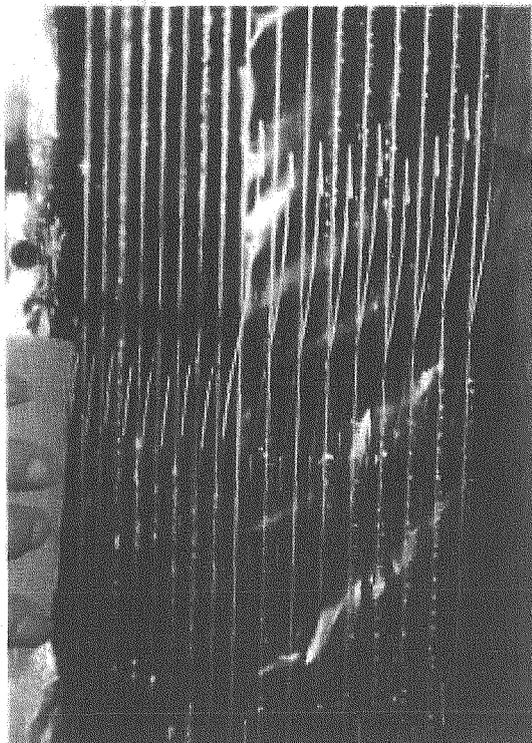


(ラッパ管下部)

付図 2.3.3-10 (1/4) 中温洗浄試験のナトリウム付着状況 (ケース 1)

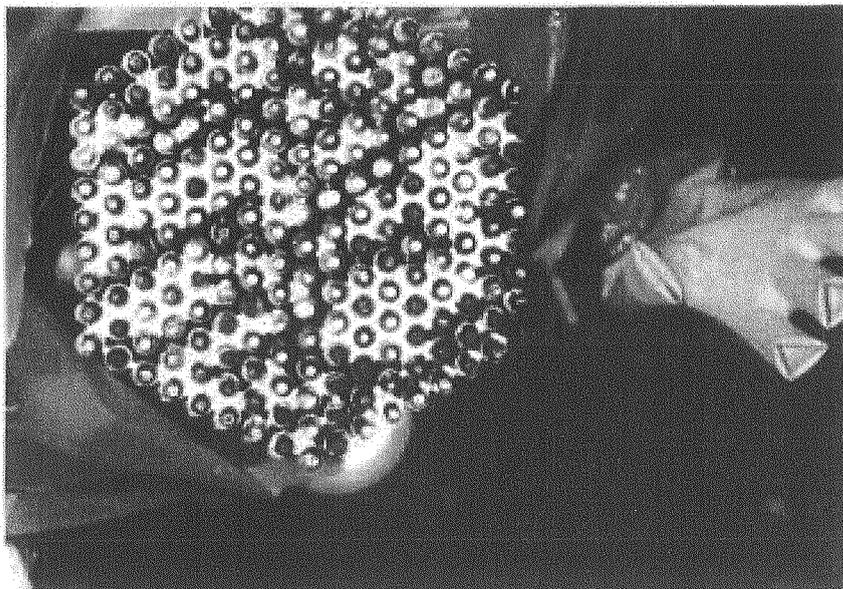
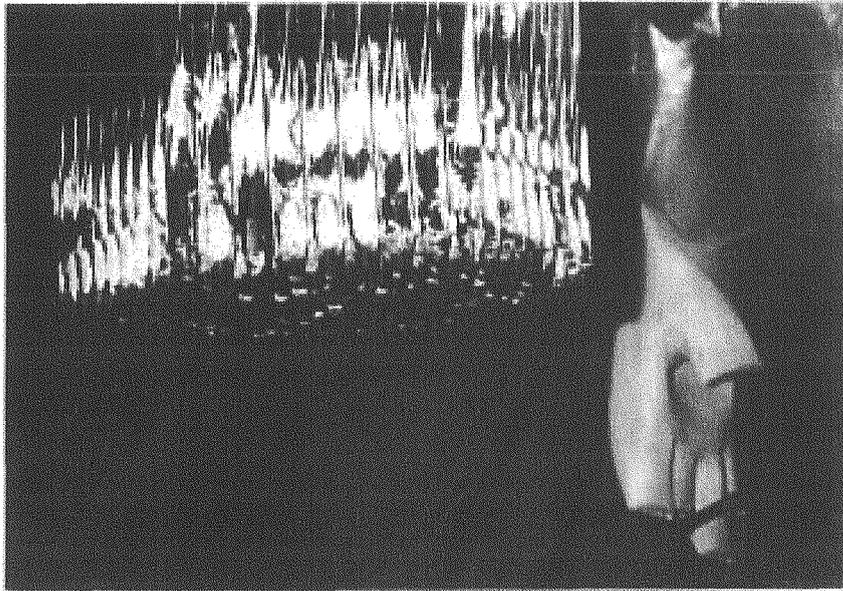


(ピンバンドル上部)



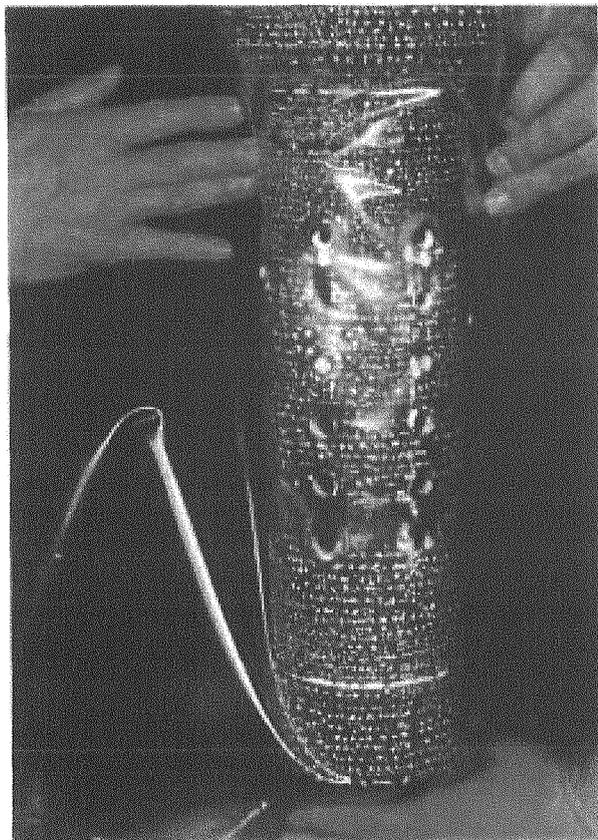
(ピンバンドル下部)

付図 2.3.3-10 (2/4) 中温洗浄試験のナトリウム付着状況 (ケース 1)



(ピンバンドル下端)

付図 2. 3. 3-10 (3/4) 中温洗浄試験のナトリウム付着状況 (ケース 1)



(エントランスノズル部)

付図 2.3.3-10 (4/4) 中温洗浄試験のナトリウム付着状況 (ケース 1)

付 2.3.4 水浸漬時影響評価試験

3.2 節および 3.3 節で記述した高温および中温洗浄後の模擬燃料集合体を水浸漬する際の圧力を測定して、水浸漬時の影響評価を行った。水浸漬時影響評価試験の試験条件を以下に示す。

- ・水浸漬速度 : 0.6m/min
- ・圧力センサ設置位置 : 付図 2.3.4-1
- ・圧力センササンプリング周期 : 10kHz

試験時に観測された圧力を付図 2.3.4-2~13 に示す。試験結果を付表 2.3.4-1 および付表 2.3.4-2 にまとめる。圧力ピークは主にエントランスノズルや燃料ピン下端部が水浸漬する際に発生することが観察された、洗浄試験時に観察されたエントランスノズル部や燃料ピン下端部に残留している塊状のナトリウムが圧力ピークの原因となっていると考えられる。

模擬燃料集合体を水浸漬した場合の最大発生応力は高温洗浄後で 0.026~0.554MPa、中温洗浄後で 0.17~6.14MPa と測定された。また、ナトリウム残留量と最大圧力に相関関係は見られなかった。ナトリウム残留量と最大圧力に相関がみられないのは塊状のナトリウム残留が圧力発生の原因となっているため、ナトリウム量よりも塊状残留の有無の方が発生圧力に影響が強いためと考えられる。

以下では試験の結果得られた発生圧力が被覆管の座屈を生じないことを確認した。被覆管の外圧による座屈は以下の式（機械工学便覧）から評価される。

$$\sigma_{\theta} = 0.9 \times \frac{E}{4(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{R} \right)^2$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{k^2 + 1}{k^2 - 1} P$$

E : 縦弾性係数、18400 (kgf/m²)

ν : ポアソン比、0.3

t : 肉厚、0.234 (mm)

R : 外半径、8.5 (mm)

k : 外径/内径

P : 外圧制限値 (kgf/m²)

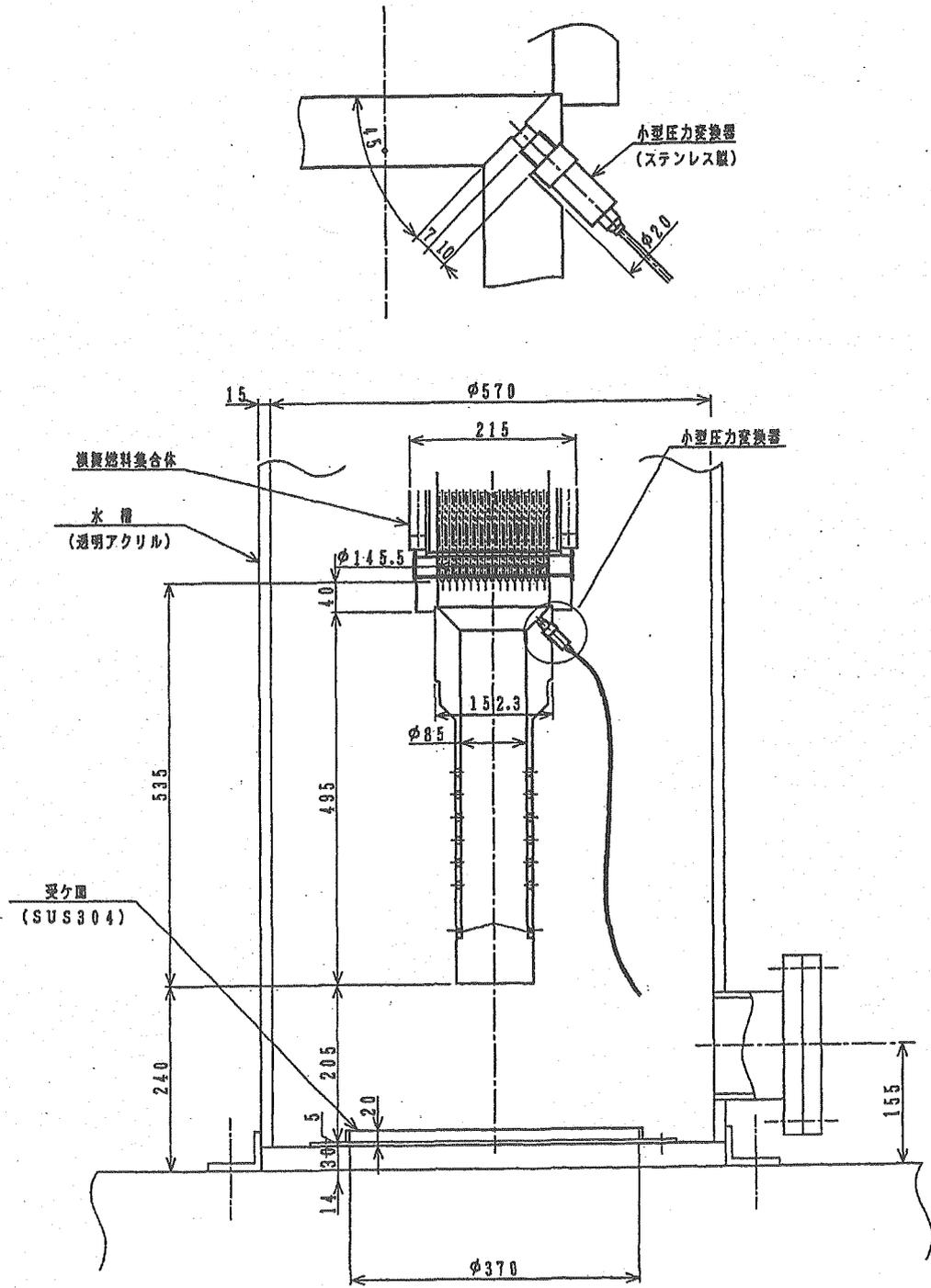
外圧の許容値は何らかの原因で新燃料を洗浄する可能性も考慮して内圧を 0MPa とすると、7.65MPa と評価される。試験の結果得られた最大発生圧力は高温洗浄後 0.55MPa、中温洗浄後 6.14MPa のため許容値を下回るが中温洗浄では余裕が少ないと考えられる。

付表2.3.4-1 水浸漬時影響評価試験結果 (高温洗浄後)

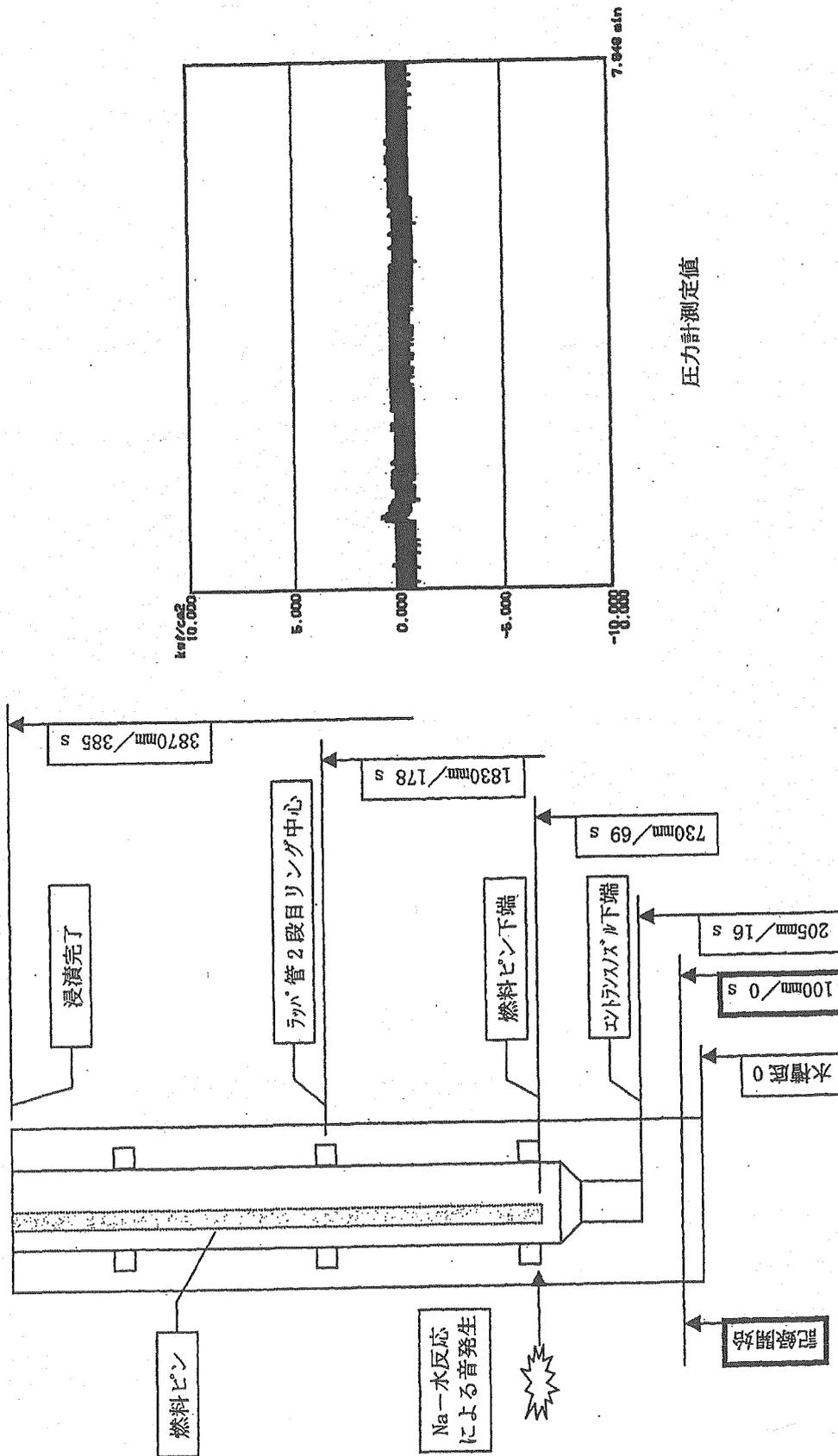
洗浄試験ケース	単位	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6
発熱量	kW	0	0	4	0	4
アルゴンガス温度	°C	500				
アルゴンガス流量 (集合体内)	Nm3/min	5.5				
アルゴンガス流量 (総流量)	Nm3/min	7				
洗浄槽下部ヒータ設定温度	°C	600				
水浸漬速度	m/min	0.6				
ナトリウム量	g	121	109	115	114	78
最大圧力(ゲージ)	MPa	0.083	0.253	0.554	0.152	0.026

付表2.3.4-2 水浸漬時影響評価試験結果 (中温洗浄後)

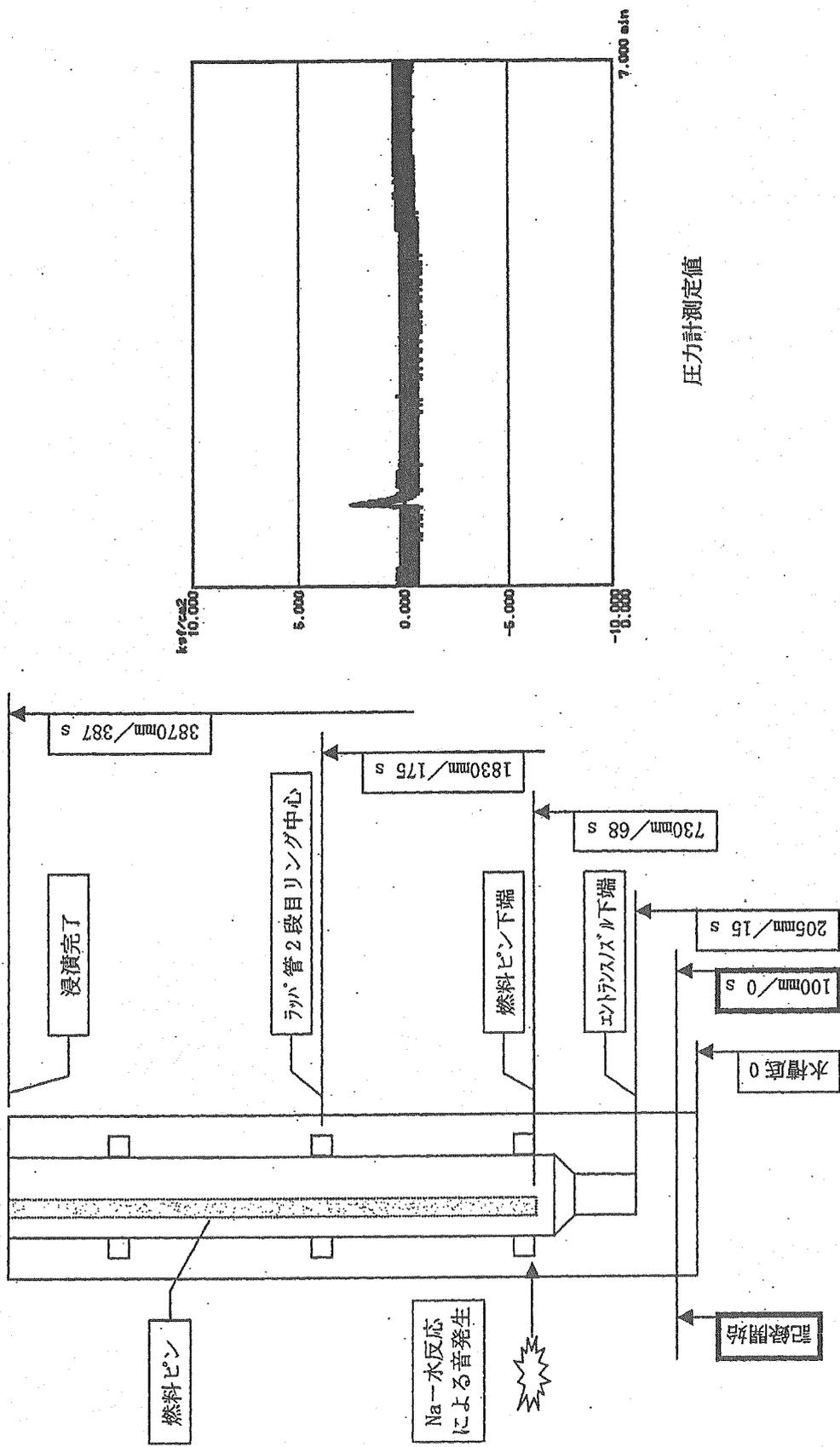
洗浄試験ケース	単位	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7	ケース8
発熱量	kW	4	4	4	4	4	0	0
アルゴンガス温度	°C	300						
アルゴンガス流量 (集合体内)	Nm3/min	2			3.5		2	
アルゴンガス流量 (総流量)	Nm3/min	7						
洗浄槽下部ヒータ設定温度	°C	250			600			
水浸漬速度	m/min	0.6						
ナトリウム量	g	196	183	254	175	179	212	180
最大圧力(ゲージ)	MPa	0.27	1.81	2.57	4.77	0.17	0.41	6.14



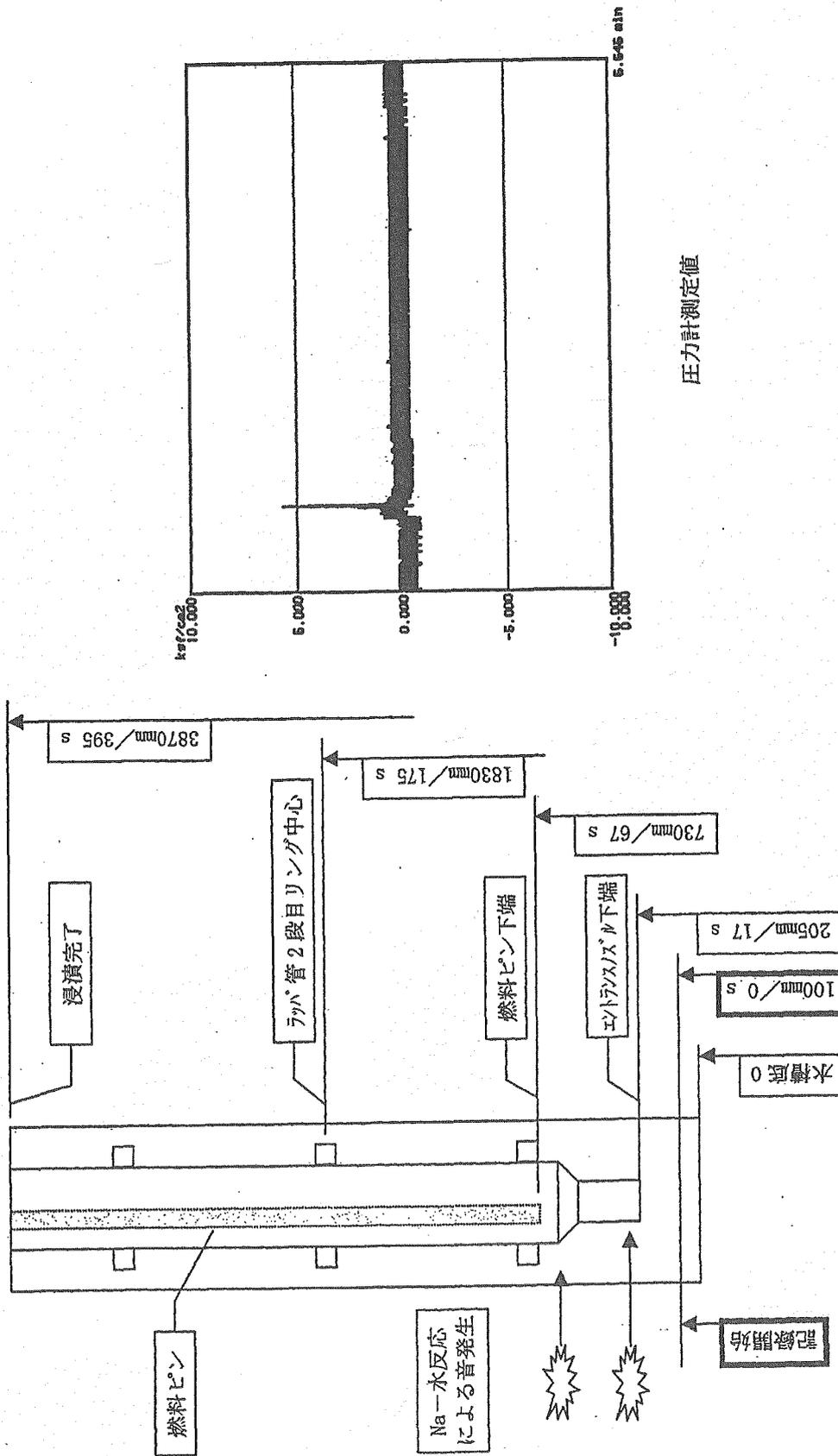
付図 2.3.4-1 水浸漬時影響試験の圧力計測位置



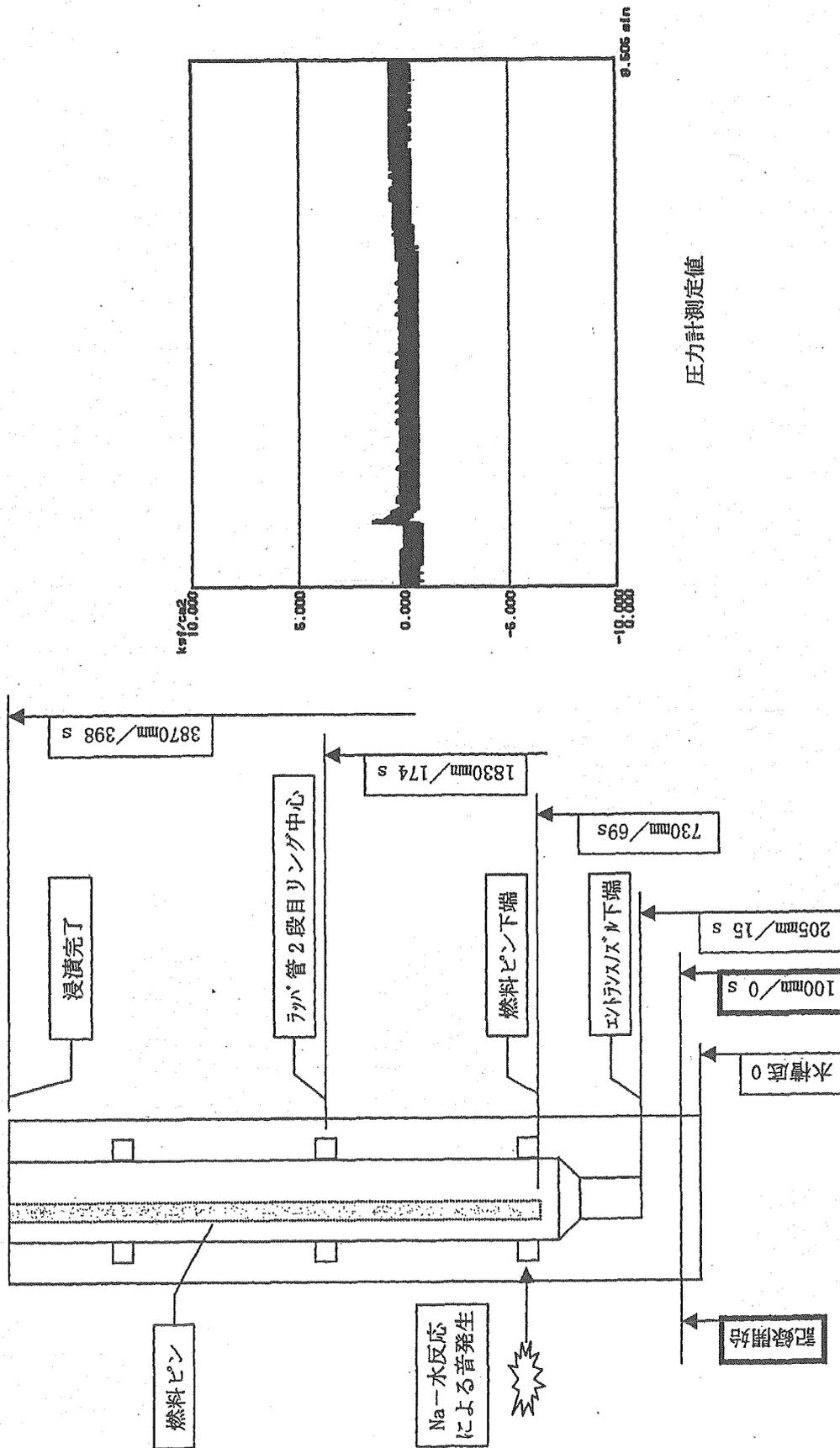
付図 2.3.4-2 水浸漬時影響試験の圧力測定値 (高温洗浄ケース 2)



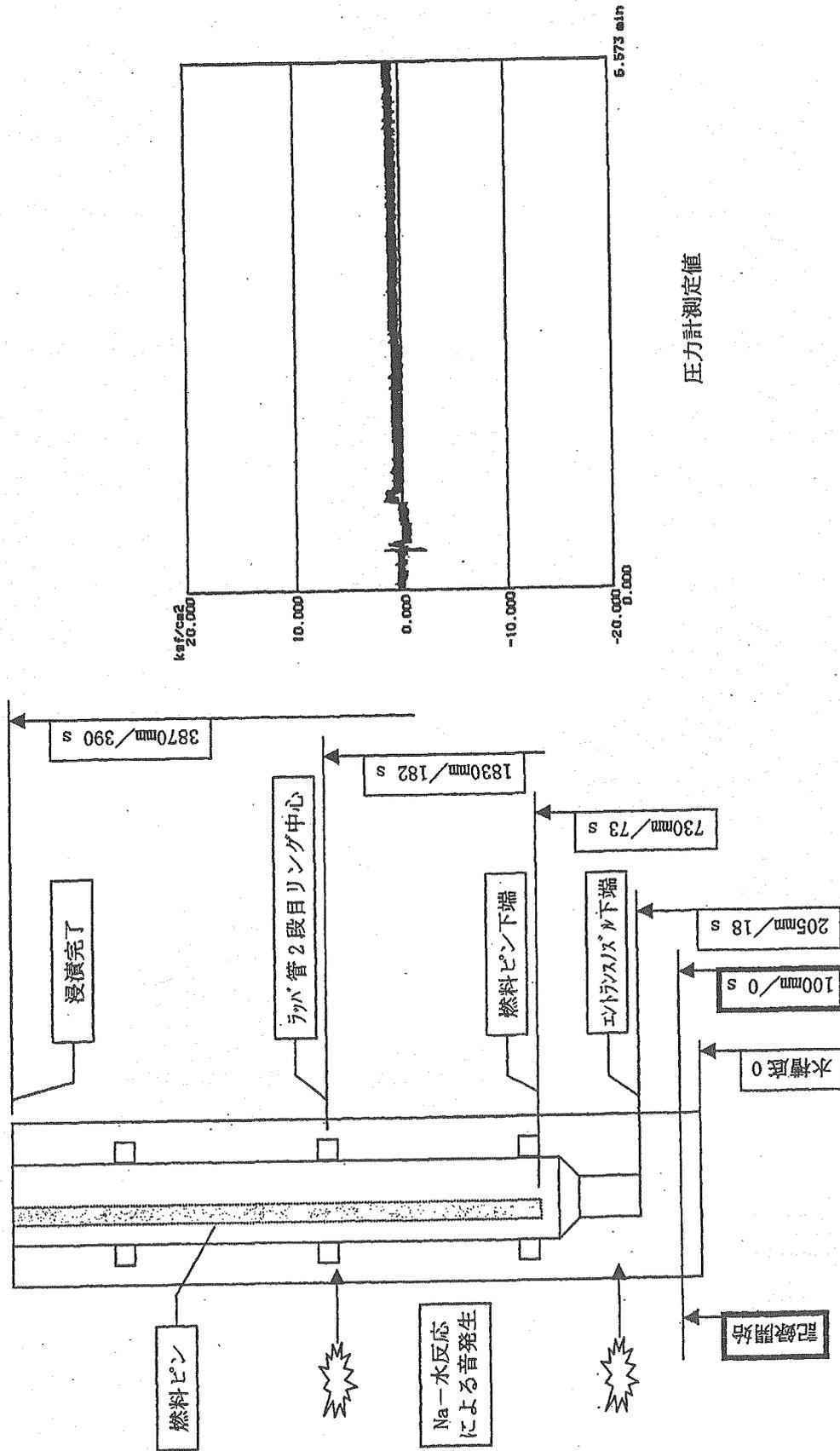
付図 2.3.4-3 水浸漬時影響試験の圧力測定値 (高温洗浄ケース 3)



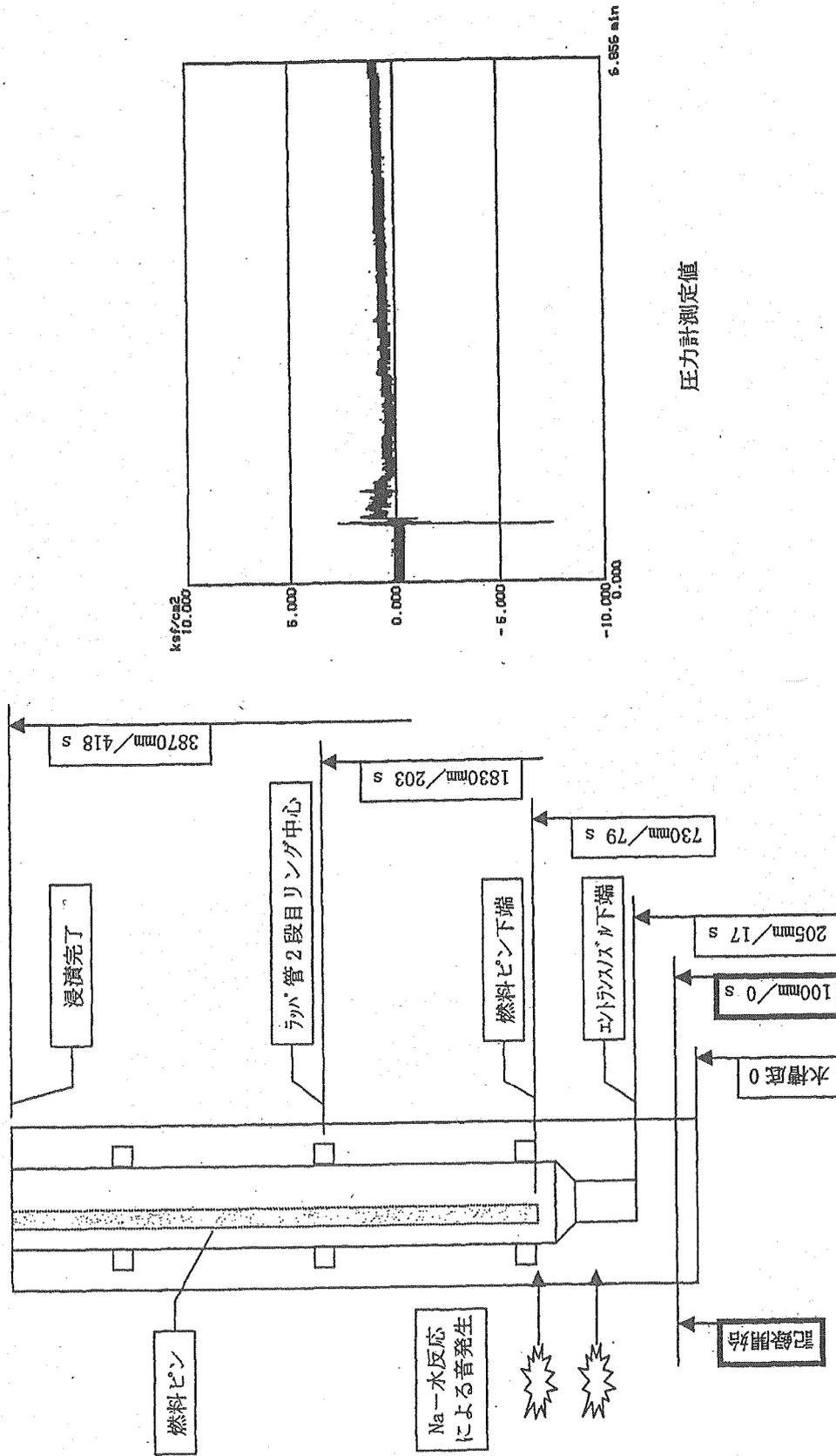
付図 2.3.4-4 水浸漬時影響試験の圧力測定値 (高温洗浄ケース 4)



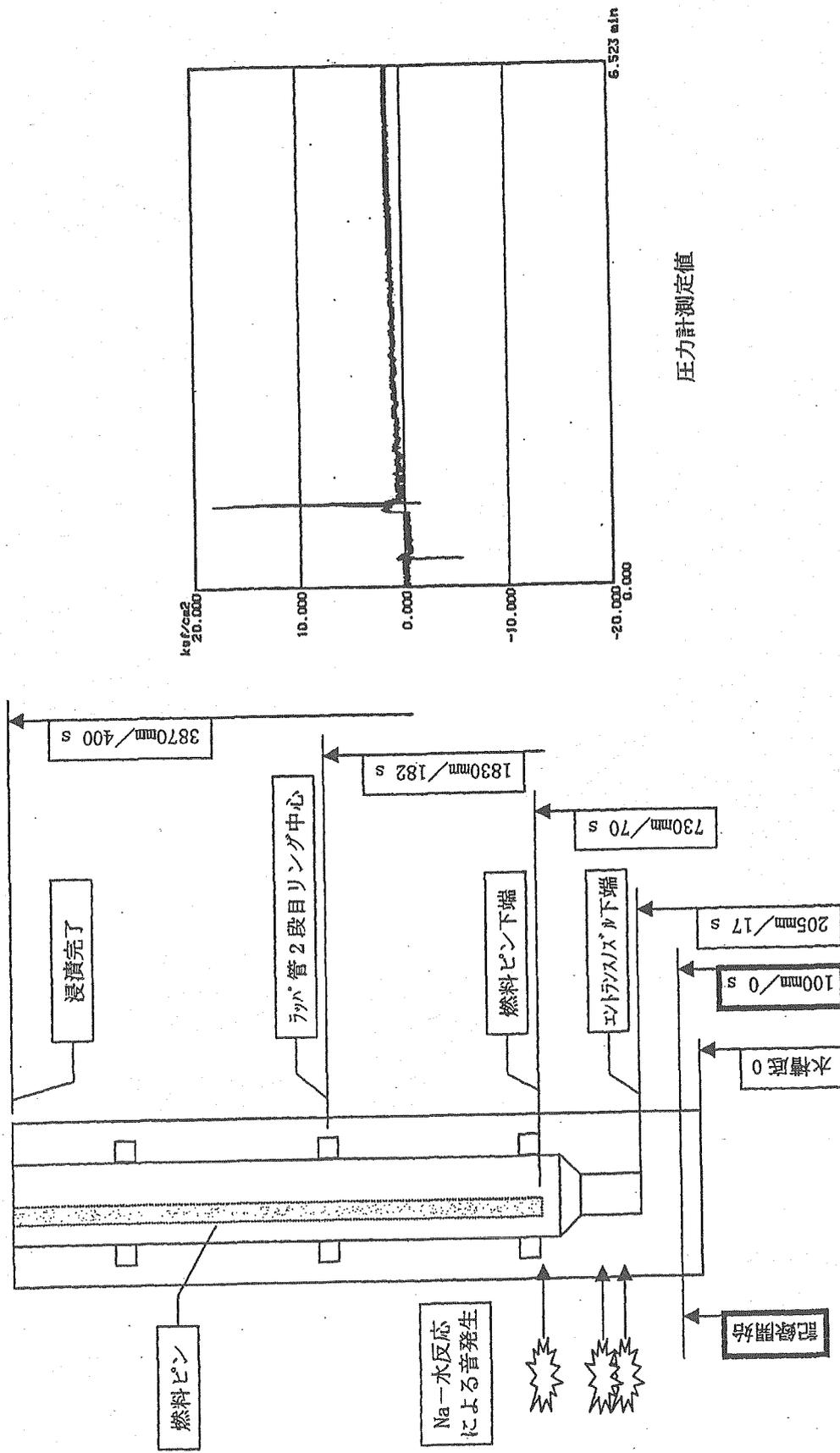
付図 2.3.4-5 水浸漬時影響試験の圧力測定値 (高温洗浄ケース 5)



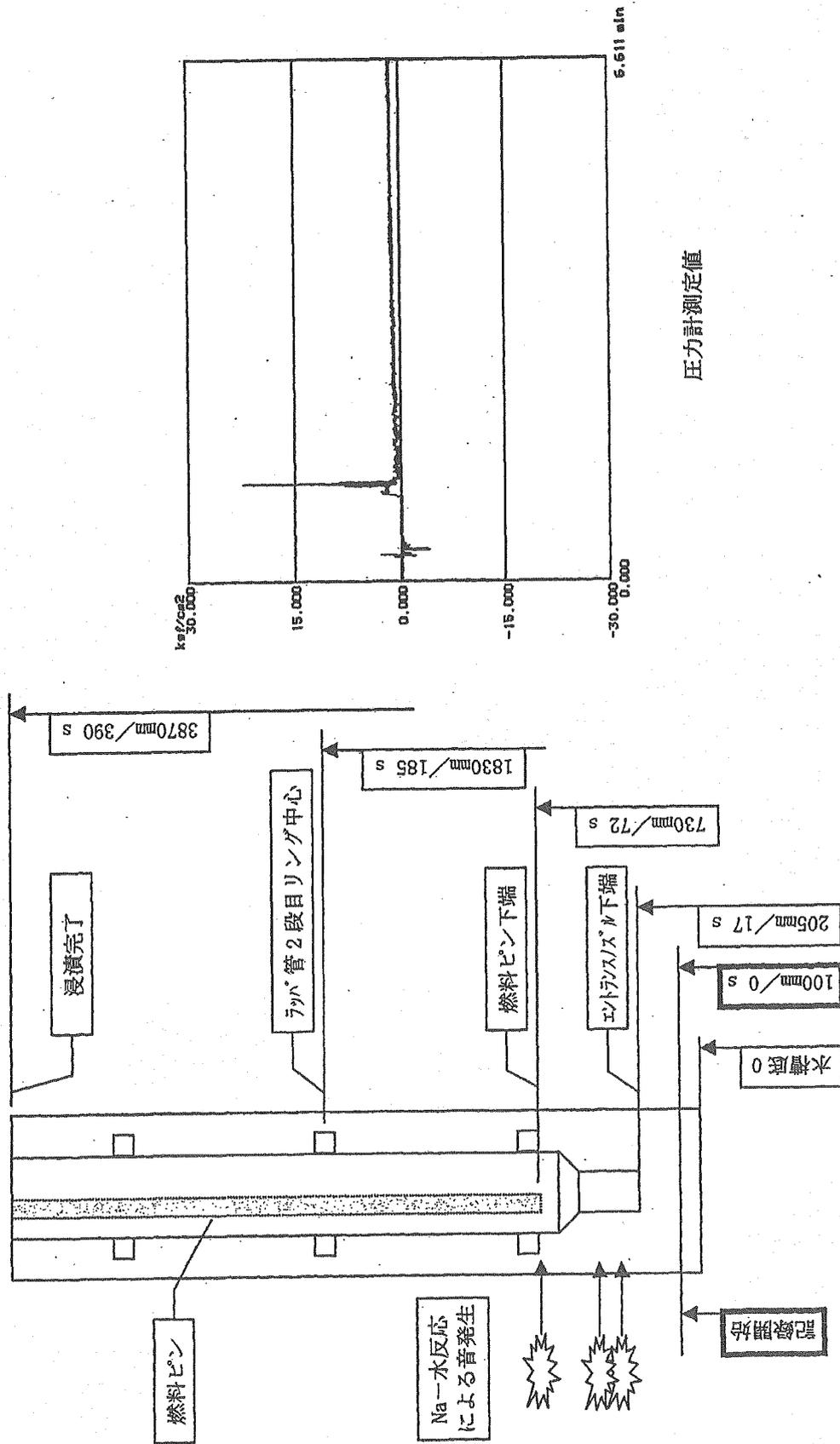
付図 2.3.4-6 水浸漬時影響試験の圧力測定値 (高温洗浄ケース6)



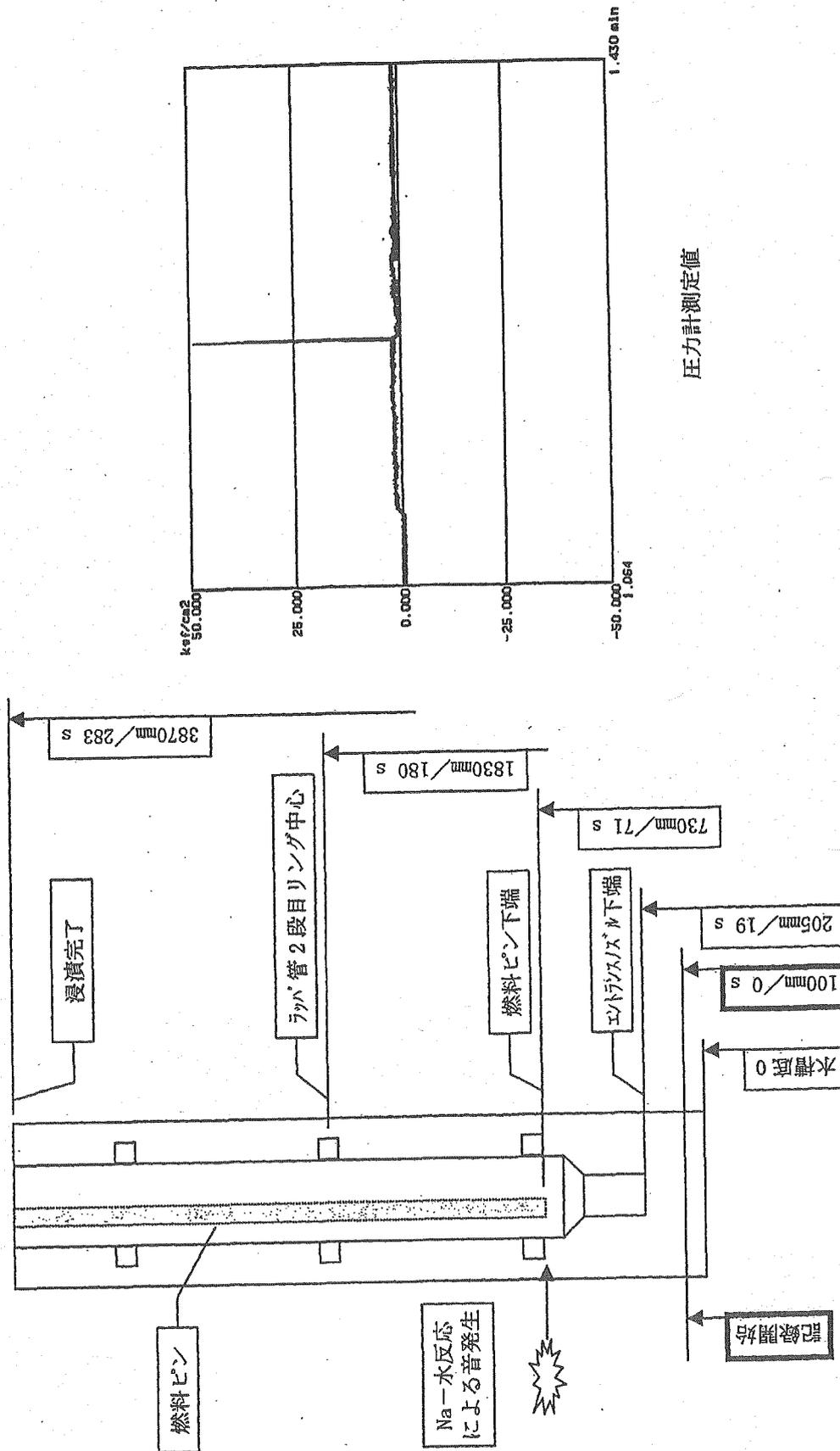
付図 2.3.4-7 水浸漬時影響試験の圧力測定値 (中温洗浄ケース 2)



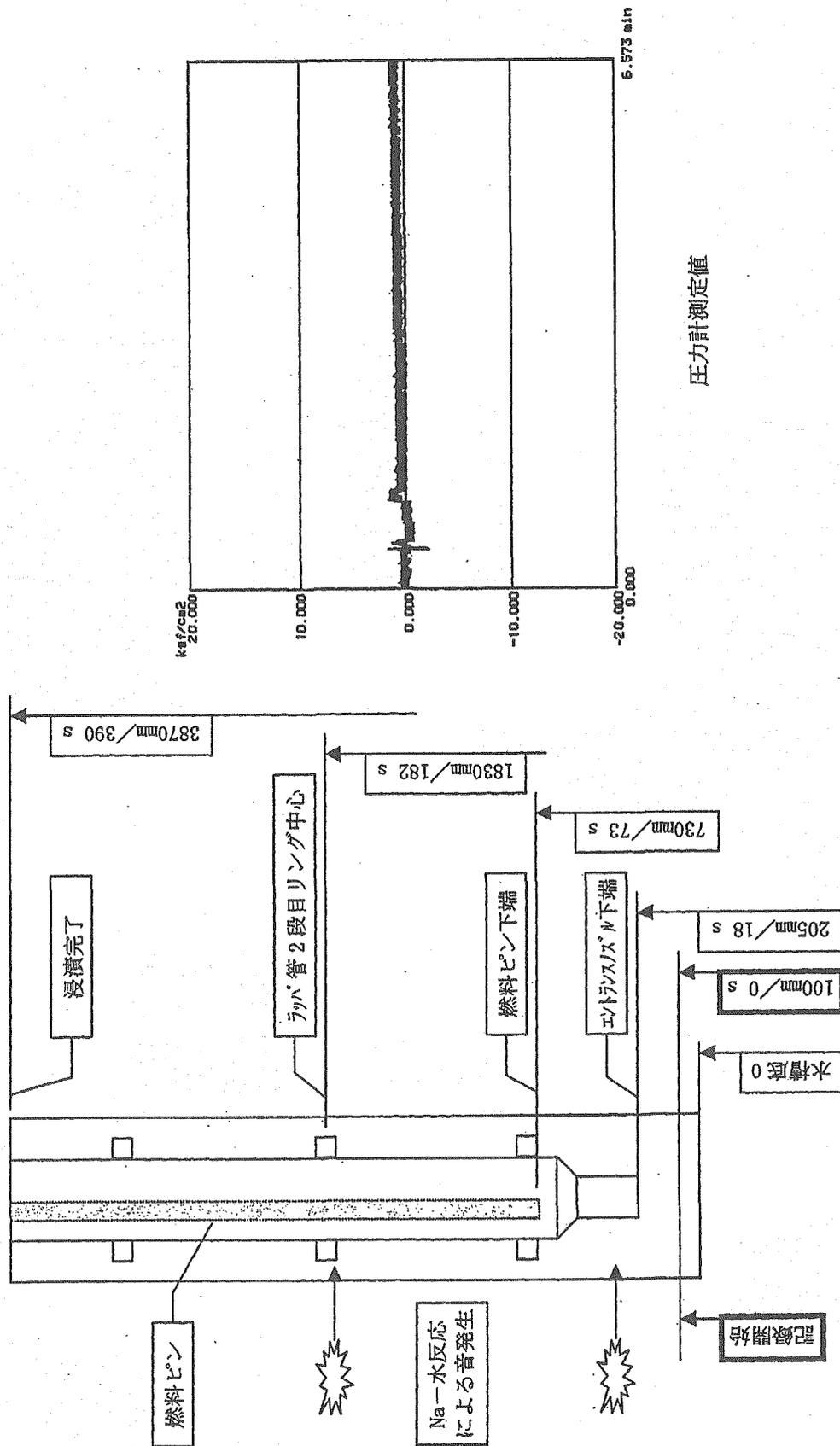
付図 2.3.4-8 水浸漬時影響試験の圧力測定値 (中温洗浄ケース 3)



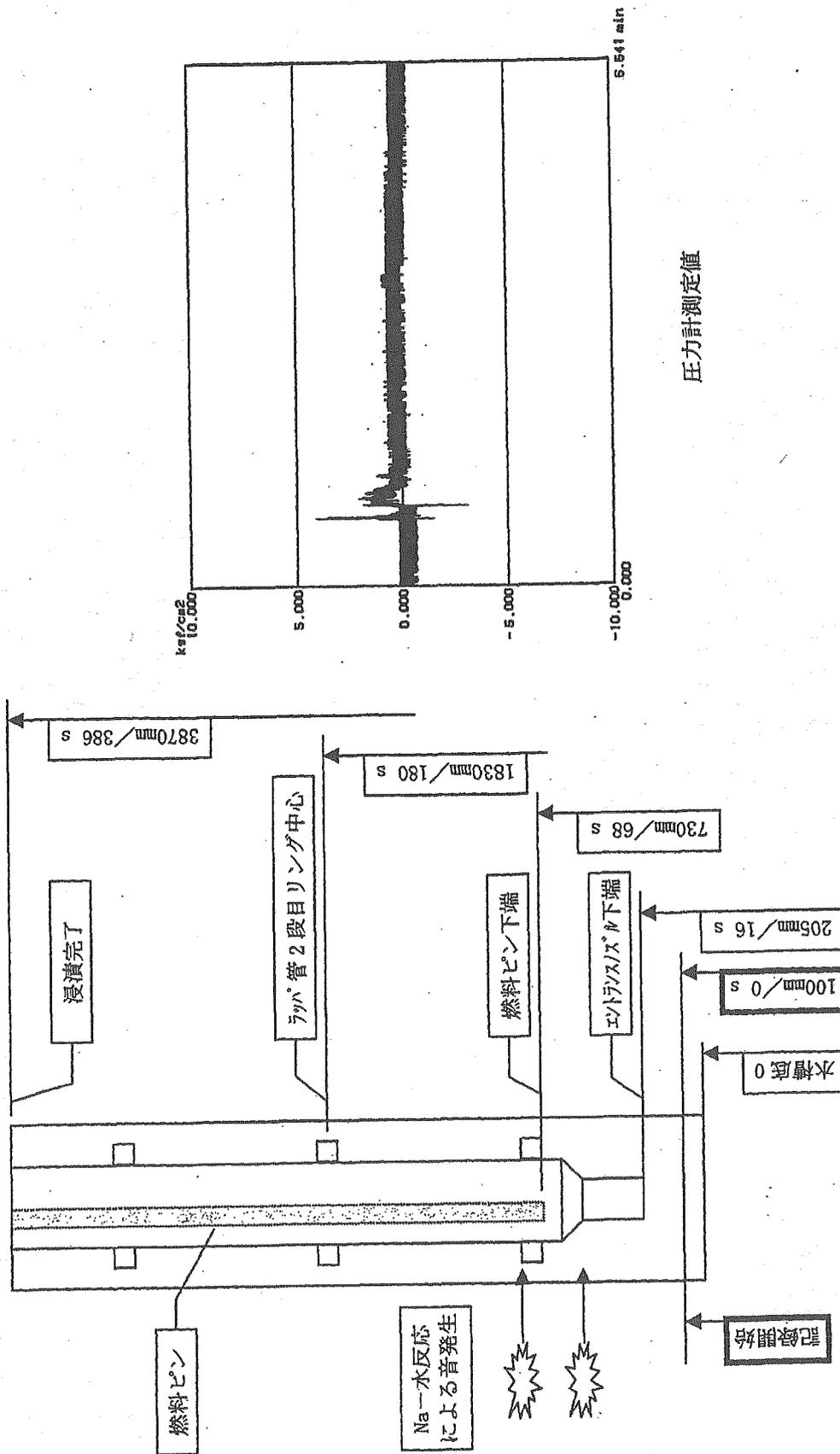
付図 2.3.4-9 水浸漬時影響試験の圧力測定値 (中温洗浄ケース4)



付図 2.3.4-10 水浸漬時影響試験の圧力測定値 (中温洗浄ケース 5)

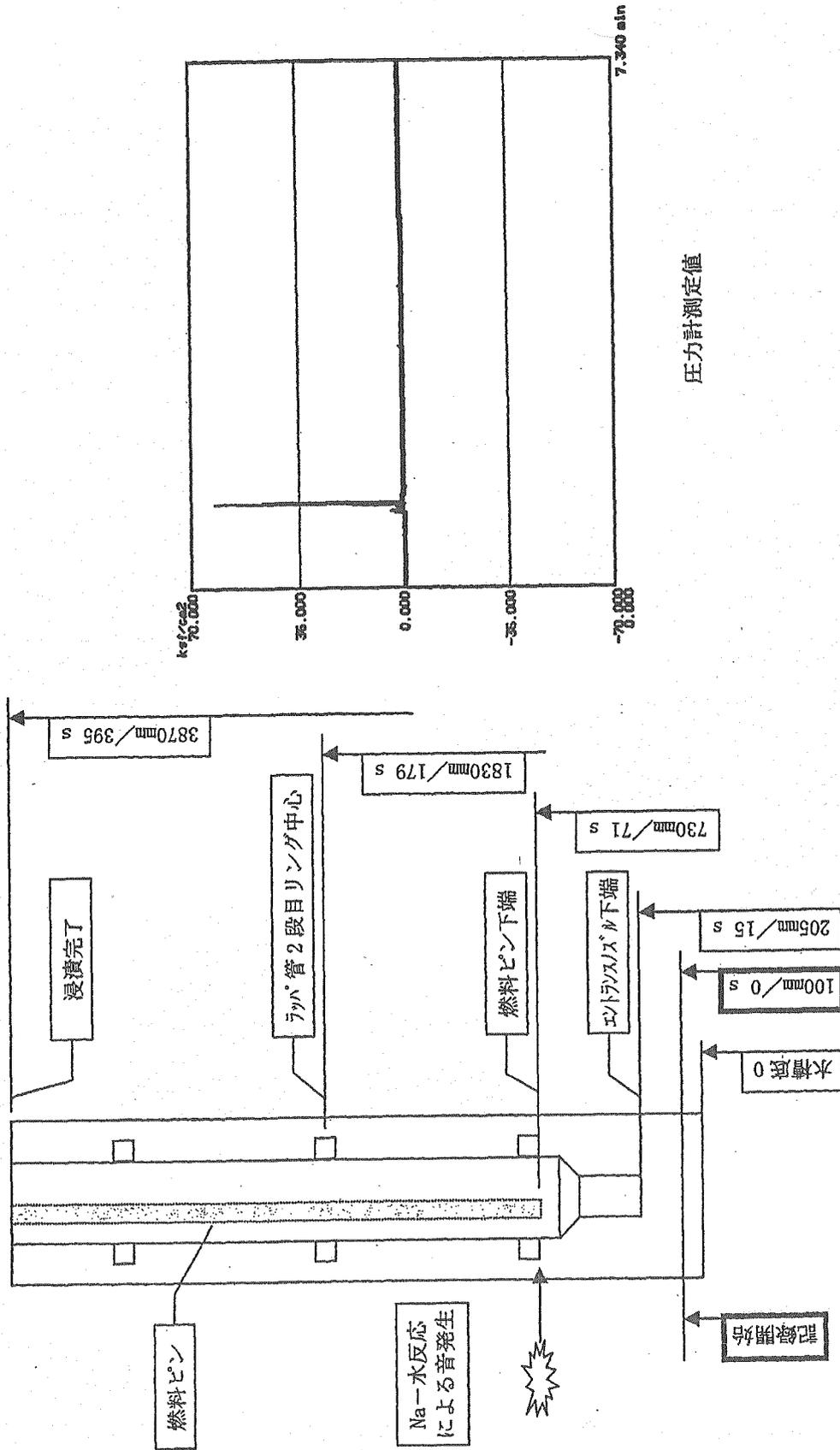


付図 2.3.4-11 水浸漬時影響試験の圧力測定値 (中温洗浄ケース 6)



圧力計測定値

付図 2.3.4-12 水浸漬時影響試験の圧力測定値 (中温洗浄ケース7)



付図 2.3.4-13 水浸漬時影響試験の圧力測定値 (中温洗浄ケース 8)

付 2.5 まとめ

本試験から以下のことが明らかになった。高温洗浄試験の結果、アルゴンガス温度 500℃、流量 5.5Nm³/min において洗浄率 65%、中温洗浄試験の結果、アルゴンガス温度 300℃、流量 2Nm³/min の洗浄率 45%と評価された。また、洗浄槽下部のヒータ温度は洗浄率に対して影響が大きく 600℃以上にすることが望まれることが明らかになった。

外圧の許容値は何らかの原因で新燃料を洗浄する可能性も考慮して内圧を 0MPa とすると、7.65MPa と評価される。試験の結果得られた最大発生圧力は高温洗浄後 0.55MPa、中温洗浄後 6.14MPa のため許容値を下回るが中温洗浄では余裕が少ないと考えられる