

高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(I)

燃料取扱系の検討

1987年12月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(I)

燃料取扱系の検討

竹内 則彦 * , 荒谷 恵治 ** , 田村 政昭 *
中西 征二 * , 谷山 洋 *

要 旨

高速増殖大型炉の燃料取扱系の最適化を図ることを目的として、IVS方式(In-Vessel Storage ; 炉内貯蔵方式)とEVS方式(Ex-Vessel Storage ; 炉外貯蔵方式)の燃料取扱系について設備設計を実施し、比較検討を行った。

IVS方式については、空気セルの削除及び使用済燃料の稠密貯蔵化を図り、その成立性を確認した。これによって、要素技術設計研究(II)で実施された設計の約13%が削減された。

EVS方式については、保持筒内ナトリウムポットEVS方式に成立性があり、最大20kwの崩壊熱を持つ使用済燃料が貯蔵出来ることがわかった。

EVS方式は設備物量の観点からも、IVS方式に競合出来、①炉容器径の縮小化、②ナトリウム系から水系への燃料移送プロセスの削除、③炉外NISの実現化のために、高速増殖大型炉の燃料取扱系として有望な概念であると考えられる。

* 大洗工学センター技術開発部プラント工学室

** 本社動力炉開発推進調整部実証炉技術開発室

Key Design Parameter Study (I) for Large
Scale-up Fast Breeder Reactor

Study on Fuel Handling System

Norihiko Takeuchi*, Keiji Chatani**
Masaaki Tamura*, Seiji Nakanishi*
and Hiroshi Taniyama*

Abstract

In order to optimize the fuel handling system of Large Scale-up Fast Breeder Reactor, the equipment design of the IVS (In-Vessel Storage) type fuel handling system and of the EVS (Ex-Vessel Storage) type were conducted and compared with each other.

As concerns IVS type, the equipments designed in Key Technological Design Study (II) was reduced by about 13% for elimination of the air cell and high density storage of spent fuel.

With regard to EVS type, it was found that Holding Cylinder Sodium pot EVS type was practical and that it could store spent fuel with 20kW decay heat for each assembly at maximum.

It can be considered that EVS type is coordinate with IVS type from a viewpoint of materials and advantageous to Large Scale-up Fast Breeder Reactor for ① reduction of reactor vessel diameter, ② elimination of the fuel handling process from sodium environment to water, and ③ realization of ex-vessel NIS.

* Plant Engineering Office,
Technology Development Division, OEC

** Demonstration Plant Development Office,
Reactor Development Coordination Division, Head Office

目 次

| | |
|---------------------------------|-----|
| 1. 緒 言 | 1 |
| 2. 検討条件 | 2 |
| 2.1 プラント基本条件 | 2 |
| 2.2 燃料取扱条件 | 2 |
| 3. IVS方式による燃料取扱系の検討 | 12 |
| 3.1 主要検討条件 | 12 |
| 3.2 60年度検討システムの基本体系 | 12 |
| 3.3 プール中縦槽に係る検討 | 23 |
| 3.4 使用済燃料貯蔵ラックの稠密化の検討 | 33 |
| 3.5 破損燃料取扱に係る検討 | 41 |
| 3.6 まとめ | 49 |
| 4. EVS方式による燃料取扱系の検討 | 52 |
| 4.1 主要検討条件 | 52 |
| 4.2 EVSの概念 | 56 |
| 4.3 ナトリウムキャスクEVS方式の成立性評価 | 61 |
| 4.4 ナトリウムポットEVS方式の成立性評価 | 89 |
| 4.5 EVS方式による燃料取扱系の成立性評価 | 150 |
| 4.6 EVS方式による燃料取扱系のシステム化検討 | 152 |
| 4.7 EVS方式による燃料取扱系の設備設計 | 168 |
| 4.8 まとめ | 206 |
| 5. IVS方式及びEVS方式の比較 | 208 |
| 6. 結 言 | 212 |
| 7. 謝 辞 | 213 |
| 8. 参考文献 | 214 |
| 付 錄 | 215 |

表 リ ス ト

| | |
|--|-----|
| 表 2.2-1 炉心構成要素主要仕様 | 9 |
| 表 3.3-1 プール中継槽系統概念の比較 | 27 |
| 表 3.3-2 燃料の受渡し方法 | 28 |
| 表 3.3-3 水中台車方式選定 | 29 |
| 表 3.4-1 未臨界性解析検討内容 | 36 |
| 表 3.5-1 破損燃料の洗浄に関する条件 | 44 |
| 表 3.5-2 破損燃料からのFP放出条件 | 45 |
| 表 3.5-3 破損燃料取扱上の課題と設備設計への影響 | 46 |
| 表 3.6-1 燃料冷却に係る系統数の比較 | 50 |
| 表 3.6-2 メンテナンス(機構数)の比較 | 51 |
| 表 4.3-1 原子数密度 | 65 |
| 表 4.3-2 遮蔽材の巨視的断面積 | 71 |
| 表 4.3-3 キャスク表面線量率計算値 | 74 |
| 表 4.3-4 増倍率および表面線量率計算値 | 81 |
| 表 4.3-5 キャスク線量率設計値 | 81 |
| 表 4.4-1 燃料貯蔵臨界解析結果 | 97 |
| 表 4.4-2 貯蔵設備側壁必要遮蔽厚 | 101 |
| 表 4.4-3 Arガスセル内ナトリウムポットEVS方式での天井壁必要遮蔽厚 | 102 |
| 表 4.4-4 保持筒内ナトリウムポットEVS方式での天井壁必要遮蔽厚 | 110 |
| 表 4.4-5 保持筒内貯蔵方式燃料貯蔵設備の燃料貯蔵条件 | 120 |
| 表 4.4-6 貯蔵設備に対する安全上の要求条件のまとめ | 134 |
| 表 4.4-7 燃料ピンギャップ中FP量 | 143 |
| 表 4.4-8 Arガスセルでの燃料移送中の安全性に関する安全上の要求条件 | 144 |
| 表 4.5-1 各種EVS方式の貯蔵可能使用済燃料崩壊熱及び貯蔵開始可能時期 | 151 |
| 表 4.6-1 使用済燃料分類 | 157 |
| 表 4.6-2 領域別崩壊熱 | 158 |
| 表 4.6-3 領域別崩壊熱 | 159 |
| 表 4.7-1 EVS方式燃料取扱設備(保持筒内貯蔵方式)主要仕様 | 169 |
| 表 4.7-2 貯蔵設備・設備仕様 | 176 |
| 表 4.7-3 冷却設備・設備仕様 | 177 |
| 表 4.7-4 インセルクレーンの仕様 | 180 |

| | |
|------------------------------------|-----|
| 表 4.7-5 Ar ガスセル雰囲気調整設備機器仕様 | 184 |
| 表 4.7-6 Ar ガスセル雰囲気調整設備機器仕様 | 185 |
| 表 4.7-7 ドアバルブ本体仕様 | 189 |
| 表 4.7-8 キャスク接続装置仕様 | 189 |
| 表 4.7-9 キャスク移送台車仕様 | 192 |
| 表 4.7-10 地下台車仕様 | 195 |
| 表 4.7-11 ナトリウムポット方式燃料取扱設備の物量 | 204 |
| 表 4.7-12 ナトリウムポット方式建家等の面積 | 205 |
| 表 5.1-1 IVS 方式と EVS 方式の比較 | 210 |
| 表 5.1-2 IVS 方式と EVS 方式の物量比較 | 211 |

図 リ ス ト

| | |
|--|----|
| 図 2.1-1 原子炉補助建物立面図 | 4 |
| 図 2.1-2 原子炉補助建物平面図 | 5 |
| 図 2.2-1 炉心構成要素形状(炉心燃料) (1/3) | 6 |
| " (ブランケット燃料) (2/3) | 7 |
| " (制御棒) (3/3) | 8 |
| 図 3.2-1 燃料移送経路 | 16 |
| 図 3.2-2 燃料取扱系配置図(60年度) | 17 |
| 図 3.2-3 燃料取扱系配置図 | 18 |
| 図 3.2-4 燃料移送経路 | 19 |
| 図 3.2-5 不活性ガスセル内移送機の動作速度、動作ストローク及びユニット動作時間 | 20 |
| 図 3.2-6 プール中継槽、水中台車及びプール移送機の動作ストロークとユニット動作時間 | 21 |
| 図 3.2-7 燃料取扱スケジュール | 22 |
| 図 3.3-1 プール中継槽系統図 | 30 |
| 図 3.3-2 プール中継槽構造概念図 | 31 |
| 図 3.3-3 水中台車構造概念図 | 32 |
| 図 3.4-1 集合体セルモデル(無限配列) | 36 |
| 図 3.4-2 S/F 水中貯蔵〔層別装荷〕(ケース1)(中心空領域なし) | 37 |
| 図 3.4-3 " (ケース2)(中心空領域あり) | 37 |
| 図 3.4-4 燃料ピッチと実効増倍率の関係(無限配列) | 38 |
| 図 3.4-5 有限配列及び層別貯蔵の効果 | 38 |
| 図 3.4-6 バッヂ領域間距離と実効増倍率の関係 | 39 |
| 図 3.4-7 層別貯蔵(中心空領域なし)の稠密性の評価 | 40 |
| 図 3.4-8 " (中心空領域付) | 40 |
| 図 3.5-1 缶詰缶概念図 | 47 |
| 図 3.5-2 缶詰装置概念図 | 48 |
| 図 3.6-1 物量比較 | 50 |
| 図 4.1-1 炉心燃料の崩壊熱量(内側炉心) | 53 |
| 図 4.1-2 " (外側炉心) | 54 |
| 図 4.1-3 ブランケット燃料の崩壊熱量 | 55 |
| 図 4.2-1 ナトリウムキャスク EVS方式システム基本構想 | 57 |
| 図 4.2-2 Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式基本概念 | 59 |

| | |
|--|-----|
| 図 4.2-3 保持筒内ナトリウムポット EVS 方式基本概念 | 60 |
| 図 4.3-1 ナトリウムキャスク基本構成 | 62 |
| 図 4.3-2 移送ポット概念図 | 63 |
| 図 4.3-3 使用済燃料キャスクモデル | 66 |
| 図 4.3-4 移送ポット配列ピッチ, 遮蔽材と実効増倍率 | 68 |
| 図 4.3-5 遮蔽体厚と実効増倍率 | 69 |
| 図 4.3-6 線量率径方向分布 | 75 |
| 図 4.3-7 キャスク必要遮蔽厚 | 77 |
| 図 4.3-8 ナトリウムキャスク構造図 | 79 |
| 図 4.3-9 フィンおよびポリエチレン層伝熱促進構造 | 84 |
| 図 4.3-10 発熱率と燃料被覆管最高温度との関係 | 85 |
| 図 4.3-11 発熱率とポリエチレン最高温度との関係 | 86 |
| 図 4.3-12 発熱率とキャスク自然通風量の関係 | 87 |
| 図 4.3-13 キャスク 1 体に収納可能な使用済燃料集合体数 | 88 |
| 図 4.4-1 使用済燃料移送ポット概念図 | 91 |
| 図 4.4-2 Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式貯蔵部概念 | 92 |
| 図 4.4-3 保持筒内ナトリウムポット EVS 方式貯蔵部概念 | 93 |
| 図 4.4-4 1 次元解析による実効増倍率(保持筒内ナトリウムポット EVS 方式) | 96 |
| 図 4.4-5 3 次元解析による実効増倍率(保持筒内ナトリウムポット EVS 方式) | 96 |
| 図 4.4-6 径方向線量率分布(計算値) | 103 |
| 図 4.4-7(1/2) 軸方向線量率分布(計算値)コンクリート天井壁(Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式) | 104 |
| (2/2) " (保持筒内ナトリウムポット EVS 方式) | 105 |
| 図 4.4-8 側壁コンクリート厚と透過線量率 | 106 |
| 図 4.4-9(1/2) 天井コンクリート厚と透過線量率(普通コンクリート)(保持筒内ナトリウムポット EVS 方式) | 108 |
| (2/2) 天井コンクリート厚と透過線量率(重コンクリート)(保持筒内ナトリウムポット EVS 方式) | 109 |
| 図 4.4-10 吸排気ダクト構成概念図 | 113 |
| 図 4.4-11 Ar ガスモル内貯蔵方式における燃料温度計算結果 | 116 |
| 図 4.4-12 保持筒内貯蔵方式における燃料温度計算結果($\epsilon = 0.5$) | 117 |
| 図 4.4-13 " " ($\epsilon = 0.8$) | 118 |
| 図 4.4-14 " " ($\epsilon = 0.15$) | 119 |

| | |
|--|-----|
| 図 4.4-15 貯蔵燃料 1 体あたりの最高発熱率と各部の最高温度（自然通風） | 121 |
| 図 4.4-16 " " (強制通風) | 121 |
| 図 4.4-17 各部軸方向温度分布 (発熱率 20 kW , 風量 $4 \times 10^5 \text{ kg/h}$) | 122 |
| 図 4.4-18 ダクトのベンド個数の影響 ($\epsilon = 0.5$, フィルタ無し, スタック高さ 40m) | 123 |
| 図 4.4-19 " ($\epsilon = 0.5$, フィルタ有り, スタック高さ 40m) | 124 |
| 図 4.4-20 スタック高さの効果 ($\epsilon = 0.5$, フィルタ有り, ベンド個数10) | 125 |
| 図 4.4-21 Ar ガスセル内貯蔵方式におけるナトリウム漏洩時事象推移 | 129 |
| 図 4.4-22 Ar ガスセル貯蔵方式におけるポットナトリウム漏洩時各部温度分布 (ポット内 ナトリウム液位保持対策をとらない場合) | 130 |
| 図 4.4-23 保持筒内貯蔵方式におけるポットからのナトリウム漏洩時事象推移 | 131 |
| 図 4.4-24 保持筒内貯蔵時の移送ポット破損における燃料被ふく管最高温度 | 132 |
| 図 4.4-25 電源喪失による強制通風冷却喪失時事象推移 | 135 |
| 図 4.4-26 全電源喪失時の時間余裕 | 136 |
| 図 4.4-27 全電源喪失事故時の Ar ガスセル壁コンクリート温度の時間変化 | 145 |
| 図 4.4-28 Ar ガスセル漏洩率と FP 大気放出量 (事故後30日間) の関係 | 146 |
| 図 4.4-29 非常用循環系風量とよう素の大気放出量 (事故後30日間) の関係 | 147 |
| 図 4.4-30 非常用循環系起動遅れ時間とよう素の大気放出量 (事故後30日間) の関係 | 148 |
| 図 4.4-31 移送中のポットよりのナトリウム漏洩時の事象推移 | 149 |
| 図 4.6-1 領域別使用済燃料集合体崩壊熱 | 160 |
| 図 4.6-2 燃料交換計画例 | 161 |
| 図 4.6-3 領域別使用済燃料集合体崩壊熱 | 162 |
| 図 4.6-4 ナトリウム溶融のための必要発熱量 | 163 |
| 図 4.6-5 領域別使用済燃料集合体崩壊熱 | 164 |
| 図 4.6-6 He ガス・アルミバスケットキャスク温度解析 | 165 |
| 図 4.6-7 EVS 方式による燃料取扱計画 | 166 |
| 図 4.6-8 保持筒内貯蔵ナトリウムポット EVS 方式の燃料取扱系 | 167 |
| 図 4.7-1 ナトリウムポット EVS 方式系統構成図 (保持筒内貯蔵方式) | 170 |
| 図 4.7-2 ナトリウムポット EVS 方式基本配置計画図 (保持筒内貯蔵方式) | 172 |
| 図 4.7-3 燃料貯蔵設備概念図 | 174 |
| 図 4.7-4 燃料貯蔵設備冷却系系統図 | 178 |
| 図 4.7-5 燃料貯蔵 Ar ガスセル内移送機 (インセルクレーン) 概念図 | 181 |
| 図 4.7-6 燃料貯蔵用移送機 (インセルクレーン) ポット用及び燃料用アダプター概念図 | 182 |
| 図 4.7-7 Ar ガスセル霧囲気調整設備ヒートマスバランス | 186 |
| 図 4.7-8 Ar ガスセル霧囲気調整設備基本系統図 | 187 |

| | |
|------------------------------------|-----|
| 図 4.7-9 燃料貯蔵 Ar ガスセルドアバルブ概念図 | 190 |
| 図 4.7-10 キャスク移送台車概念図 | 193 |
| 図 4.7-11 地下台車概念図 | 196 |
| 図 4.7-12 燃料取扱設備全体配置計画図 1/5 | 198 |
| 図 4.7-13 " 2/5 | 199 |
| 図 4.7-14 " 3/5 | 200 |
| 図 4.7-15 " 4/5 | 201 |
| 図 4.7-16 " 5/5 | 202 |

1. 緒 言

高速増殖大型炉に於ける燃料取扱系の検討は、高速実験炉「常陽」及び原型炉「もんじゅ」の開発経験に基づき、電気出力 100 万 kW 級のプラントを対象に、合理的な燃料取扱系システムの成立性の見通しを明らかにすることを目的とし、次を基本方針としている。

- (1) 物量の削減、コンパクト化を狙った設備の合理化
- (2) 燃料交換時間の短縮
- (3) 放射性廃棄物量の低減

昭和60年度は要素技術設計研究(Ⅱ)として、上記方針の下に、使用済燃料を炉内で一定期間貯蔵する方式(In Vessel Storage : 以下「IVS方式」という)を前提に検討を行い、次の知見を得た。

- (1) IVS方式は炉心構成の大型化及びそれに伴う燃料交換機のアクセス範囲の拡大による回転プラグの大型化を招き、原子炉容器径を増大させる。
- (2) 破損燃料の IVS 貯蔵が可能か否か明確でなく、破損燃料を IVS を介さないで取り出す必要が生じた場合は、高崩壊熱燃料取扱いのための設備対応が必要である。
- (3) プランケット燃料を IVS を介さないで取り出した場合、燃料取扱時の事故(燃料破損)を想定すると、立地評価上 ^{131}I 対応が困難である。このためプランケット燃料も IVS 貯蔵し、冷却することを考えれば原子炉容器径を更に増大させることになる。
- (4) IVS 方式では、特にマトリックス方式の場合、彎曲した使用済燃料の挿入性に問題がある。
- (5) 起動系炉外中性子検出器は、IVS 燃料からの漏れ中性子による影響を受け、成立が難しくなる。

昭和61年度は、高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(I)の一環として、60年度の成果をもとに以下に示す検討を行った。

- (1) IVS 方式に関する、昭和60年度未検討項目の検討。空気セル削除ならびに使用済燃料の稠密貯蔵による設備のコンパクト化をねらった検討。
 - (2) 燃料取扱系の一層の合理化と原子炉容器径の縮小化を目指し、使用済燃料を IVS を経ずに直接取出す炉外貯蔵方式(Ex Vessel Storage : 以下「EVS方式」という)に係る検討。
- また、EVS 方式の燃料取扱系の成立性を見通した上で、高速増殖大型炉に於ける燃料取扱系の最適化を図る観点から、IVS 方式と EVS 方式を比較検討した。

2. 検討条件

2.1 プラント基本条件

本検討は電気出力 100 万 kW 級のループ型高速増殖大型炉に適用する燃料取扱設備を対象としている。

プラントの基本条件は以下に示す通りである。

- | | |
|----------------|----------------------------------|
| ① 原子炉形式 | プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料, ナトリウム冷却高速中性子炉 |
| ② プラント形式 | ループ型 |
| ③ プラント出力 | 1000 MWe |
| ④ 取り出し燃料平均燃焼度 | ~ 90000 MWD/T |
| ⑤ 原子炉出入口温度 | 500 °C / 360 °C |
| ⑥ 格納施設形式 | 建屋一体型矩形コンクリート格納施設(図 2.1-1 参照) |
| ⑦ 原子炉建物内配置 | 図 2.1-2 |
| ⑧ プラント運転スケジュール | 365 日運転, ~ 70 日定検 |
| ⑨ 燃料交換時系統温度 | 200 °C |

2.2 燃料取扱条件

燃料取扱系に係る主要条件は以下に示す通りである。

- | | | |
|----------|------------------------|-----------------|
| ① 取扱燃料仕様 | 現状・寸法 | 図 2.2-1 |
| | 主 要 目 | 表 2.2-1 |
| ② 燃料交換本数 | 炉心燃料 | 118 ~ 119 体 |
| | ブランケット燃料 | 37 ~ 38 体 |
| | 制御棒 | 11 体 |
| ③ 燃料交換頻度 | 通常 1 回/年, 原子炉停止時(定検ごと) | |
| | 炉心燃料 | : : 3 サイクル運転後交換 |
| | ブランケット燃料 | : 4 サイクル運転後交換 |
| ④ 燃料制限温度 | | |

| | 通常時及び異常な過渡変化時 | 事故時 |
|-------|---------------|--------|
| 燃料取扱時 | 675 °C | 850 °C |
| 燃料貯蔵時 | 550 °C | 675 °C |

燃料被覆管肉厚中心温度

⑤ 使用済燃料搬出，新燃料受入

使用済燃料の搬出及び新燃料の受入れは，原子炉運転中に行う。

- 4 -

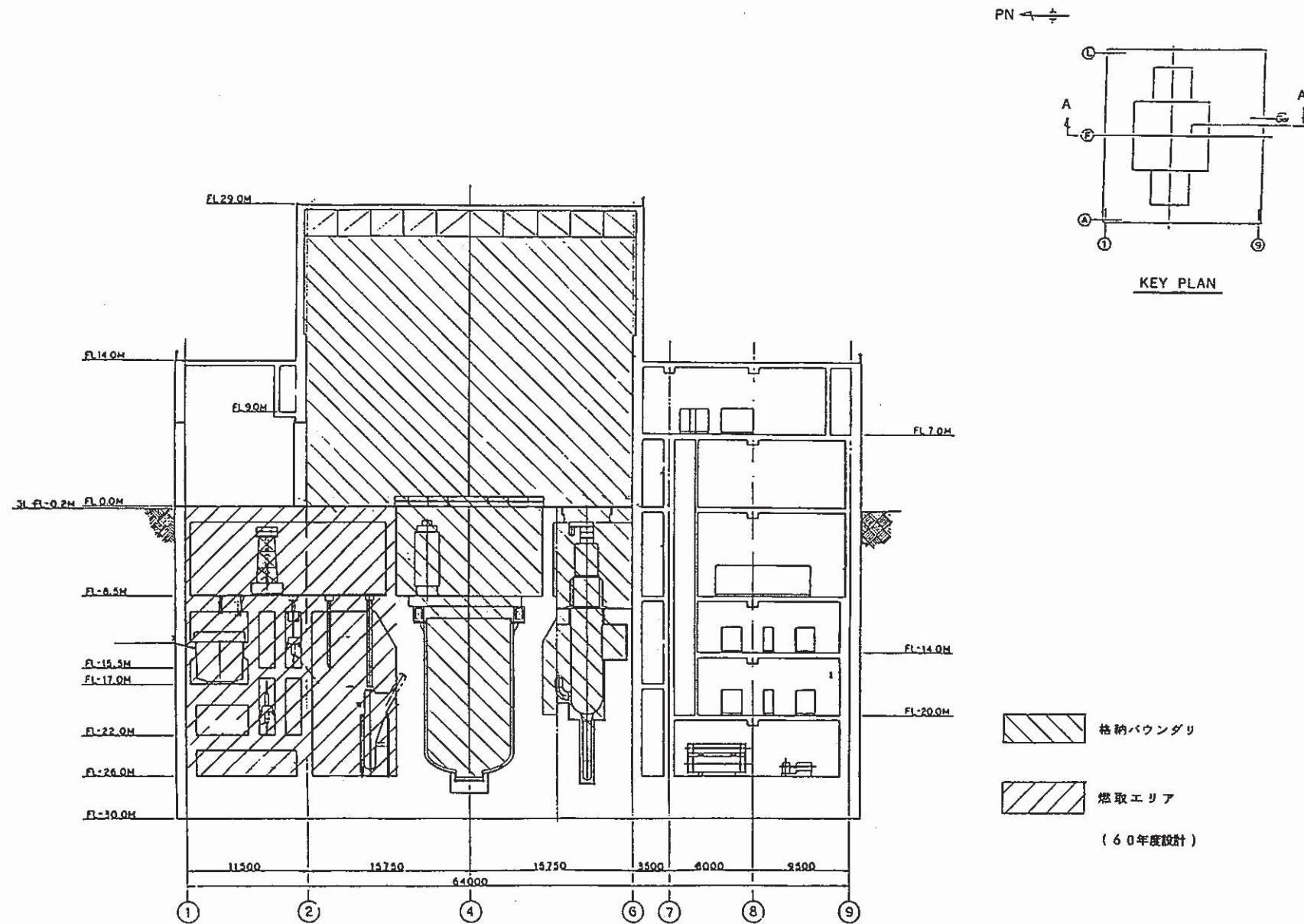


図 2.1-1 原子炉補助建物立面図

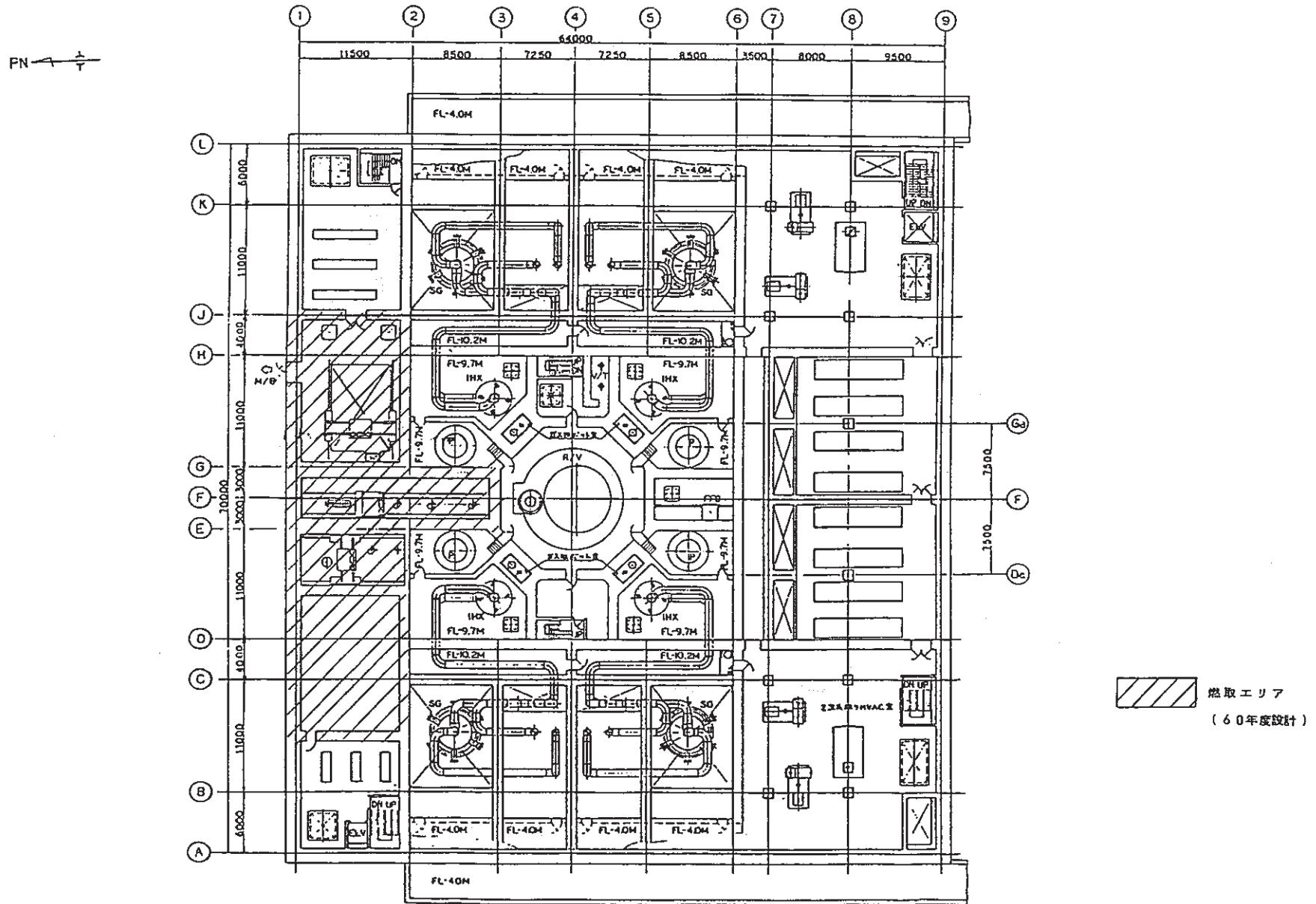


図 2.1-2 原子炉補助建物平面図

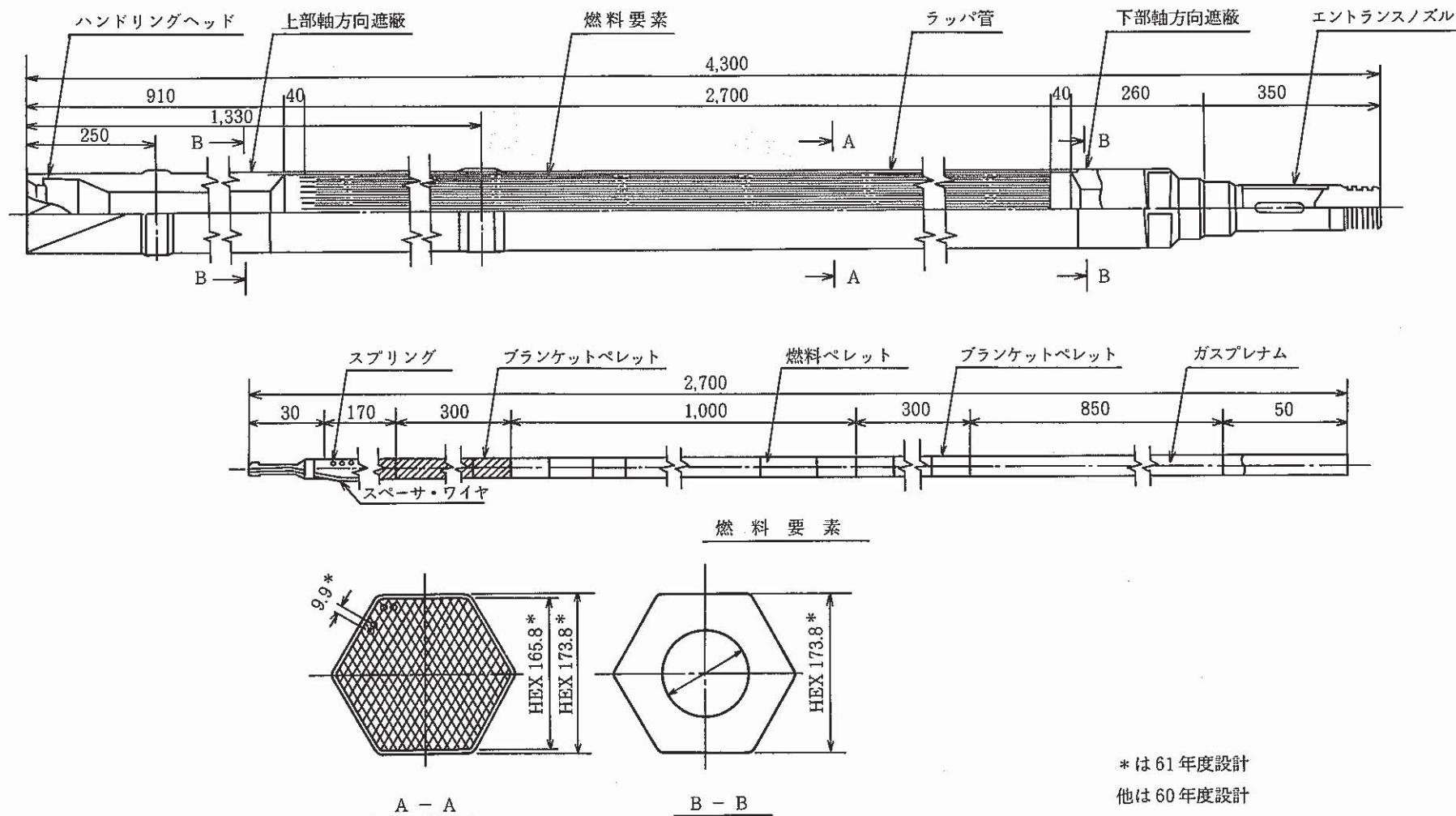


図 2.2-1 炉心構成要素形状(炉心燃料)(1/3)

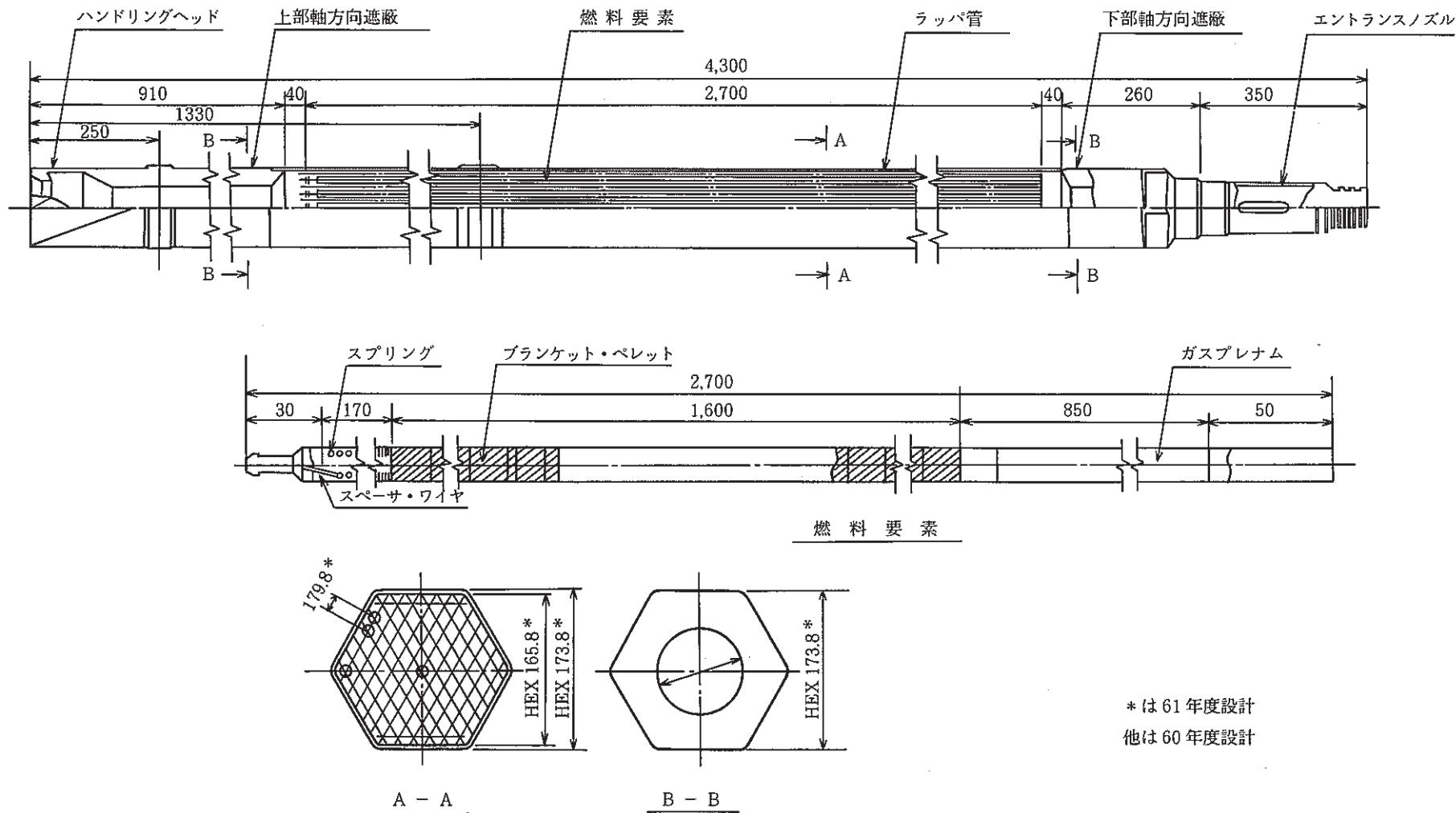
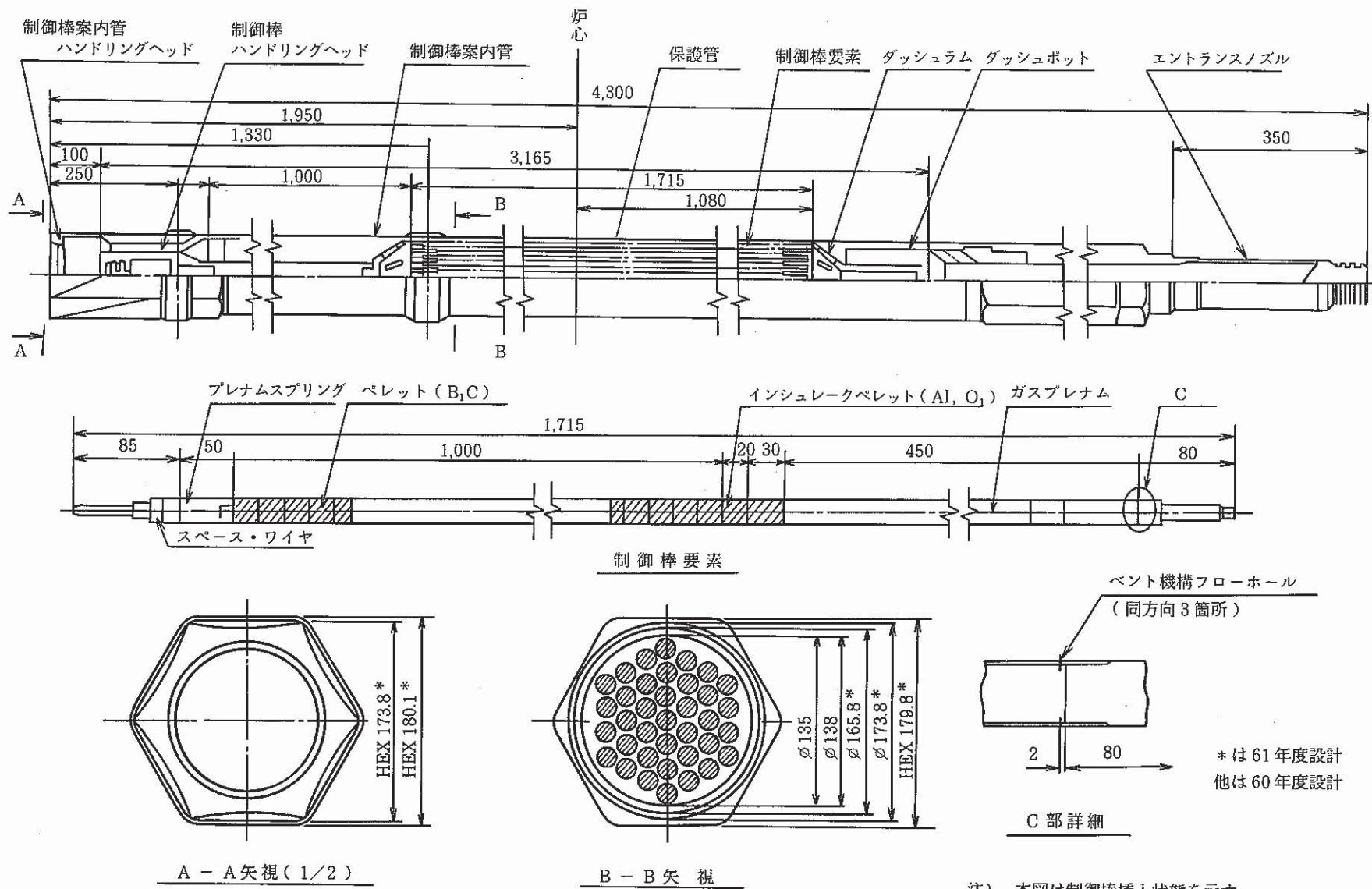


図 2.2-1 炉心構成要素形状(ブランケット燃料)(2/3)



注) 本図は制御棒挿入状態を示す。

図 2.2 - 1 炉心構成要素形状 (制御棒) (3 / 3)

表 2.2 - 1 (1 / 3) 炉心構成要素主要仕様

| 項 目 | 仕 様 | 備 考 |
|--|-----------------------|--------|
| 1. 炉心燃料 | | |
| 1) 炉心燃料ペレット | | |
| a) 材質 | プルトニウム ・ウラン混合酸化物 | |
| b) プルトニウム富化度 (w/o • PuO ₂ / (PuO ₂ + UO ₂)) | | |
| 平衡炉心(内側／外側炉心) | 16.3 / 21.2 | |
| c) 外 径 (mm) | 7.32 * | |
| d) 密 度 (%TD) | 92.0 | |
| e) O/M比 | 1.98 | |
| 2) 軸方向ブランケット燃料ペレット | | |
| a) 材質 | 劣化ウラン酸化物 | |
| b) ウラン235含有率 (w/o) | 0.3 | |
| c) 外 径 (mm) | 7.32 * | |
| d) 密 度 (%TD) | 94.5 | |
| e) O/M比 | 2.0 | |
| 3) 被覆管 | | |
| a) 材 料 | 20%CW SUS 316相当分 | |
| b) 外 径 (mm) | 8.3 * | |
| c) 内 径 (mm) | 7.5 * | |
| 4) 燃料要素 | | |
| a) 型 式 | インテグラル密封型 下部ガスプレナム | |
| b) 全 長 (mm) | 2,700 | |
| i) 炉心燃料体長さ (mm) | 1,000 | |
| ii) ブランケット燃料体長さ (mm) (上部／下部) | 300 / 300 | |
| c) スペーサワイヤ径 (mm) | 1.5 * | |
| d) ワイヤ巻付ピッチ (mm) | 165 | |

表 2.2 - 1 (2 / 3) 炉心構成要素主要仕様

| 項 目 | 仕 様 | 備 考 |
|----------------------|---------------------|----------------|
| 5) 燃料集合体 | | |
| a) 形 状 | 正六角形断面 | |
| b) 燃料要素配列ピッチ (mm) | 9.9 * | p/d 比 = 1.19 * |
| c) 燃料要素数 (本) | 正三角形配列 271 | |
| d) ラッパ管 | | |
| i) 材 質 | 20%CW SUS 316相当材 | |
| ii) 内対面間距離 (mm) | 165.8 * | |
| iii) 板 厚 (mm) | 4.0 | |
| e) 全 長 (mm) | 4,300 | |
| 2. 半径方向プランケット | | |
| 1) プランケット燃料ペレット | | |
| a) 材 質 | 劣化ウラン酸化物 | |
| b) ウラン 235 含有率 (w/o) | 0.3 | |
| c) 外 径 (mm) | 12.4 * | |
| d) 密 度 (%TD) | 94.5 | |
| e) O/M比 | 2.0 | |
| 2) 被覆管 | | |
| a) 材 質 | 20%CW SUS 316相当材 | |
| b) 外 径 (mm) | 13.4 * | |
| c) 内 径 (mm) | 12.6 * | |
| 3) 燃料要素 | | |
| a) 型 式 | 密 封 型 | |
| | 下部ガスプレナム | |
| b) 全 長 (mm) | 2,700 | |
| c) 燃料部長さ (mm) | 1,600 | |
| d) スペーサーワイヤ径 (mm) | 1.0 * | |
| e) ワイヤ巻付ピッチ (mm) | 165.0 | |

表 2.2 - 1 (3 / 3) 炉心構成要素主要仕様

| 項 目 | 仕 様 | 備 考 |
|-------------------|--------------------|--------|
| 4) 燃料集合体 | | |
| a) 形 状 | 正六角形断面 | |
| b) 燃料要素配列ピッチ (mm) | 17.98* | |
| c) 燃料要素数 (本) | 127 * | |
| d) ラッパ管 | | |
| i) 材 質 | 20%CW SUS316相当材 | |
| ii) 内対面間距離 (mm) | 165.8 * | |
| iii) 板 厚 (mm) | 4.0 | |
| e) 全 長 (mm) | 4,300 | |

*については、61年度設計による

他については、60年度設計

3. I V S方式による燃料取扱系の検討

60年度における大型炉の使用済燃料貯蔵方式については、「常陽」および「もんじゅ」の開発経験に基づき、物量の低減および配置のコンパクト化とともに廃棄物発生量の削減等の観点から大幅な合理化を狙った概念を検討した。検討にあたっては、プラント合理化の観点から炉外燃料貯蔵槽(Ex-Vessel Storage Tank: EVST)を削除でき大幅なコスト低減が可能となる炉内貯蔵方式(IVS)および再処理工場への水冷却輸送方式を前提とした。この結果、燃料洗浄方式として高温ガス洗浄方式、使用済燃料貯蔵方式として水中裸貯蔵方式、および燃料移送方式としてセル内移送方式からなる燃料取扱システムを構築し、その成立性を確認した。

今年度の検討は、60年度の成果を踏まえて燃料取扱設備の一層の合理化をめざし、特に不活性ガスセルと水プール間の雰囲気隔離対策として従来必要とされてきた空気セルを廃止することによる設備構造の簡素化方策を中心として実施した。

3.1 主要検討条件

空気セルを削除したIVS・水中裸貯蔵方式のシステムの検討にあたって設定した主要な検討条件は次の通りである。

- ① 燃料交換時期 : 通常1回／年、原子炉停止時
- ② 燃料移送時間 : 燃料取出し間隔30分を目標
- ③ 使用済燃料減衰待貯蔵方式 : 炉内貯蔵方式(IVS)
- ④ 使用済燃料崩壊熱 : 4 kW(炉心燃料、ブランケット燃料集合体とも)
- ⑤ 燃料移送方式 : 裸・セル内移送方式
- ⑥ 燃料洗浄方式 : 高温アルゴンガス洗浄方式
- ⑦ 燃料貯蔵方式 : 水中裸貯蔵方式

3.2 システム基本体系の検討

3.2.1 60年度検討システムの基本体系

60年度に設定した燃料取扱系に係る燃料移送経路及び配置図を図3.2-1、図3.2-2に示す。ここで、燃料取扱形態については、IVS方式・パケット入りを採用し、設備構成・移送経路については原子炉構造側との取り合いを炉外中継槽に設定し、かつ新燃料取扱専用領域を廃止した。

パケットに収納されて燃料出入機により炉外中継槽まで移送された使用済燃料は、不活性ガスセル内移送機によって燃料洗浄槽に入れられ、高温アルゴンガスによる付着Naの洗浄が行われる。洗浄が終了した使用済燃料は再び不活性ガスセル内移送機により吊り上げられ、地下

台車に移されて空気セル内移送機に手渡される。ここで不活性ガスセルと空気セルを設けたのは、不活性ガスセルでは未洗浄のNa付着使用済燃料を裸で取扱うため、本セル内への使用済燃料貯蔵プールからの湿分の混入を防止するためである。使用済燃料は空気セル内移送機によって水中台車に移送され、崩壊熱の減衰と再処理施設への搬出待ちのため貯蔵ラックに収納、保管される。

一方、新燃料は新燃料貯蔵ラックから不活性ガスセル内移送機によって炉外中継槽まで移送されて、炉内に装荷される。

3.2.2 空気セル削除システムの基本体系

(1) 設備構成及び配置の検討

空気セルを削除したIVS方式燃料取扱システムの配置の検討は、①燃取系の建家配置スペースは60年度設計と同様とすること、及び②空気セル、空気セル内移送機および空気セル～不活性ガスセル間の地下台車を廃止することを基本として次の4項目について行い、図3.2-3に示す配置計画を設定した。

(i) 使用済燃料キャスク搬出入方法の検討

空気セルを廃止した場合は、従来のように使用済燃料のキャスクへの装荷をB1階床上で行うことができず、またキャスク台車でキャスクをサービス建屋から燃取エリアに持込んでもキャスクピット（湿式）に移し替える必要があり、このためのクレーンが必要になる。すなわち、従来方式の延長上でキャスクに使用済燃料を装荷可能にするためには、キャスク台車及びキャスククレーンの2種類の取扱機が必要になるが、設備の簡素化を図る観点からは、キャスクを直接キャスクピットに装荷できる方式を追求するものとした。

(ii) 使用済燃料キャスクピットの設置位置

使用済燃料キャスクピットの設置位置としては、従来の空気セルの位置（図3.2-3の⑪～⑫間）と水プールエリアの2案が考えられる。前者の場合、水中台車からキャスクに移し替えるための取扱機（走行・横行式、または水中クレーンタイプ）が必要であり、かつ水プールライニングエリアが増加するなど後者に比較して不利となるため、キャスクピットは水プールエリアのプール移送機走行・横行範囲に設けるものとした。

(iii) 新燃料キャスク搬入位置

使用済燃料キャスクピットと同じ側に配置してキャスククレーンのカバーする領域を最少にすることが望ましいが、現状の⑬～⑭通り間にポートを設置し、かつ水プール必要壁厚（2m程度）を確保するのが困難なため、使用済燃料キャスクピットと不活性ガスセルに関して反対側（⑪～⑫通り間）に設けるものとした。

(iv) キャスククレーン

キャスククレーンは、前項⑬、⑭で定めたキャスク装荷位置をカバーするものとして機

器搬出入通路上に設置し、不活性ガスセル内移送機のメンテナンスのための搬出入用を兼ねるものとした。もんじゅキャスククレーンの例から設置エリアの階高は18m程度が必要と予想されるため、機器搬出入路上の天井はFL+21mとし、FL+14mを走行させる計画とした。

本配置計画に基づく設備構成は次の通りとなる。

炉外中継槽

燃料洗浄槽

破損燃料缶詰設備

新燃料輸送容器地下台車

不活性ガスセル内移送機

プール中継槽

水中台車

プール移送機

貯蔵ラック（容量 504 体以上）

新燃料貯蔵ラック（容量 168 体以上）

キャスククレーン

(2) 燃料取扱手順

設備構成及び配置の検討に基づいて設定した燃料移送経路を図3.2-4に示す。使用済燃料、新燃料及び破損燃料の取扱手順はそれぞれ次のようになる。

(i) 使用済燃料の搬出

炉外中継槽に入れられた使用済燃料は、不活性ガスセル内移送機により燃料洗浄槽に入れられ、そこで高温アルゴンガス洗浄される。洗浄が終了した使用済燃料は再び不活性ガスセル内移送機により吊り上げられ、プール中継槽に入れられる。

プール中継槽は、上部にドアバルブ、下部にシールプラグが設置されており、内部はアルゴンガス雰囲気である。プール中継槽の中では、使用済燃料は、シールプラグ上に固定される。プール中継槽に使用済燃料が入れられると、プール中継槽上部のドアバルブが閉められ、プール中継槽が不活性ガスセルから隔離されてプール中継槽に貯蔵プール水が導かれる。プール中継槽が満水になった後、水中台車で使用済燃料が固定されているシールプラグをプール中継槽から引き離し、プール移送機の動作範囲まで移送する。プール移送機は、水中台車から使用済燃料のみを取り出し、貯蔵ラックに収納する。

使用済燃料が貯蔵ラックに収納されたあと、水中台車はプール中継槽位置に戻り、シールプラグをプール中継槽に接続する。その後、プール中継槽にアルゴンガスが導かれ、プール水が排出されて、つぎの使用済燃料が運ばれるのを待つ。

キャスクはキャスククレーンでFL床からプール内に吊り下され、使用済燃料をプー

ル移送機から受取った後、再びキャスククレーンにより搬出される。

(ii) 新燃料の搬入

新燃料は検査後、新燃料輸送容器ごと新燃料輸送容器地下台車にキャスククレーンにより吊り下される。地下台車は不活性ガスセル下面に走行し接続され、不活性ガスセル内移送機により輸送容器内新燃料を新燃料貯蔵ラックに収納する。本作業は原子炉運転中に行う。燃料交換時の新燃料は、使用済燃料が洗浄されている間に、不活性ガスセル内移送機により不活性ガスセル内にある新燃料貯蔵ラックから炉外中継槽に移送され、炉内に装荷される。

(iii) 破損燃料の搬出

破損燃料は使用済燃料と同様の手順で取扱うものとした。プール中継槽に移送された破損燃料は中継槽内で水缶詰され、水プール経由で搬出する。缶詰作業は空缶をセル上部からあらかじめプール中継槽内に持ち込んだ後、不活性ガスセル内移送機を缶内に燃料を装荷し、セル上部に設置した缶フタ取扱機で実施する。

(3) 燃料取扱スケジュール

燃料出入機の燃料収容ラック数を1燃料集合体の交換に要する時間を30分と前提し、図3.2-5及び図3.2-6に示す不活性ガスセル内移送機、水プール中継槽、プール移送機、水中台車の動作速度とストローク及びユニット動作時間を考慮し、図3.2-7に示す燃料取扱スケジュールを設定した。

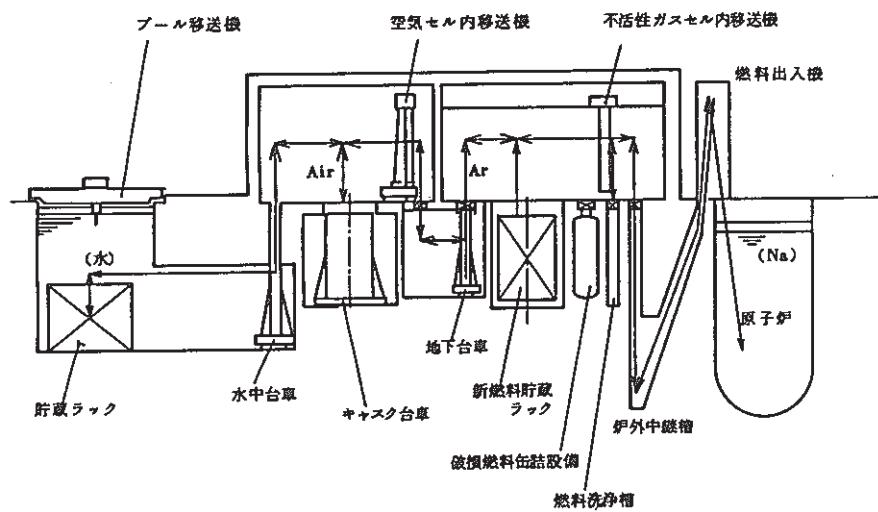
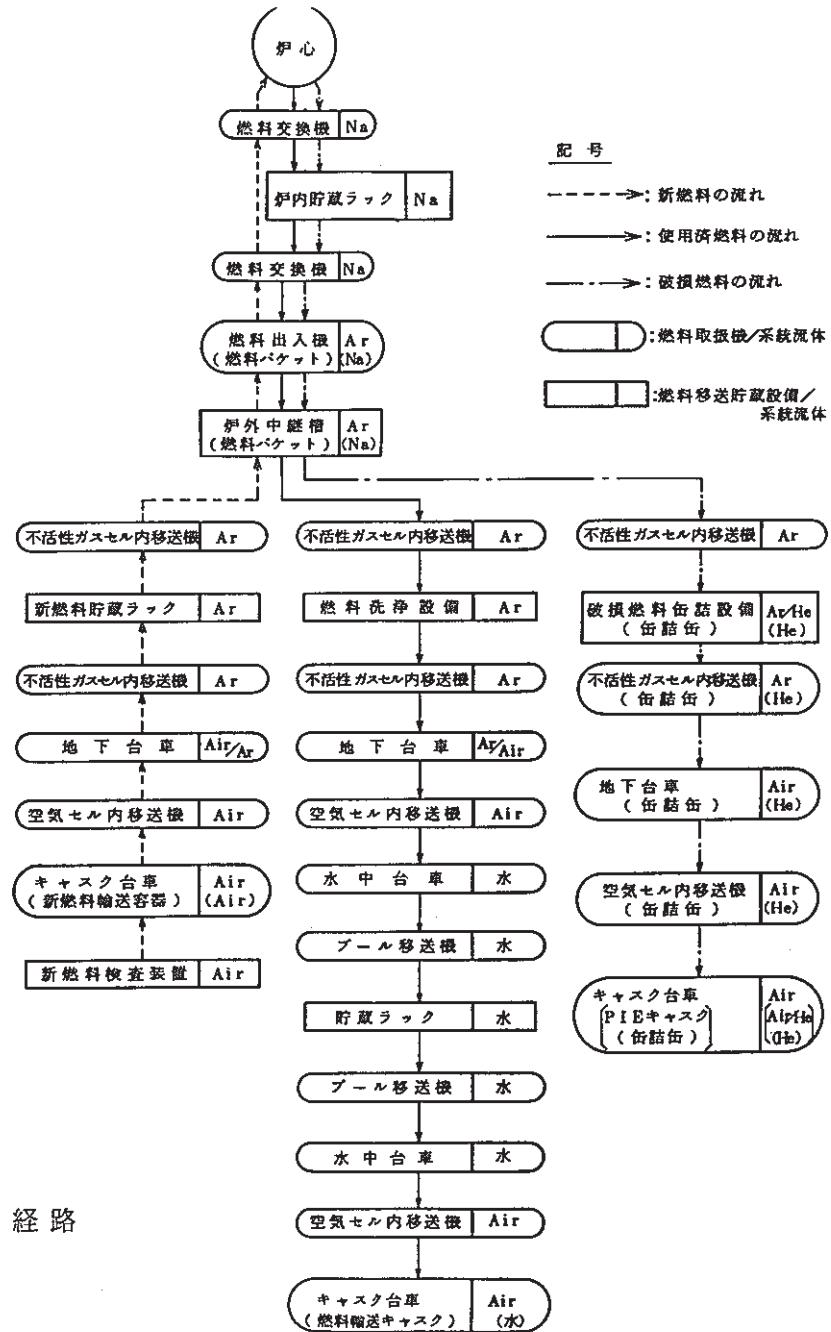


図 3.2-1 燃料移送経路



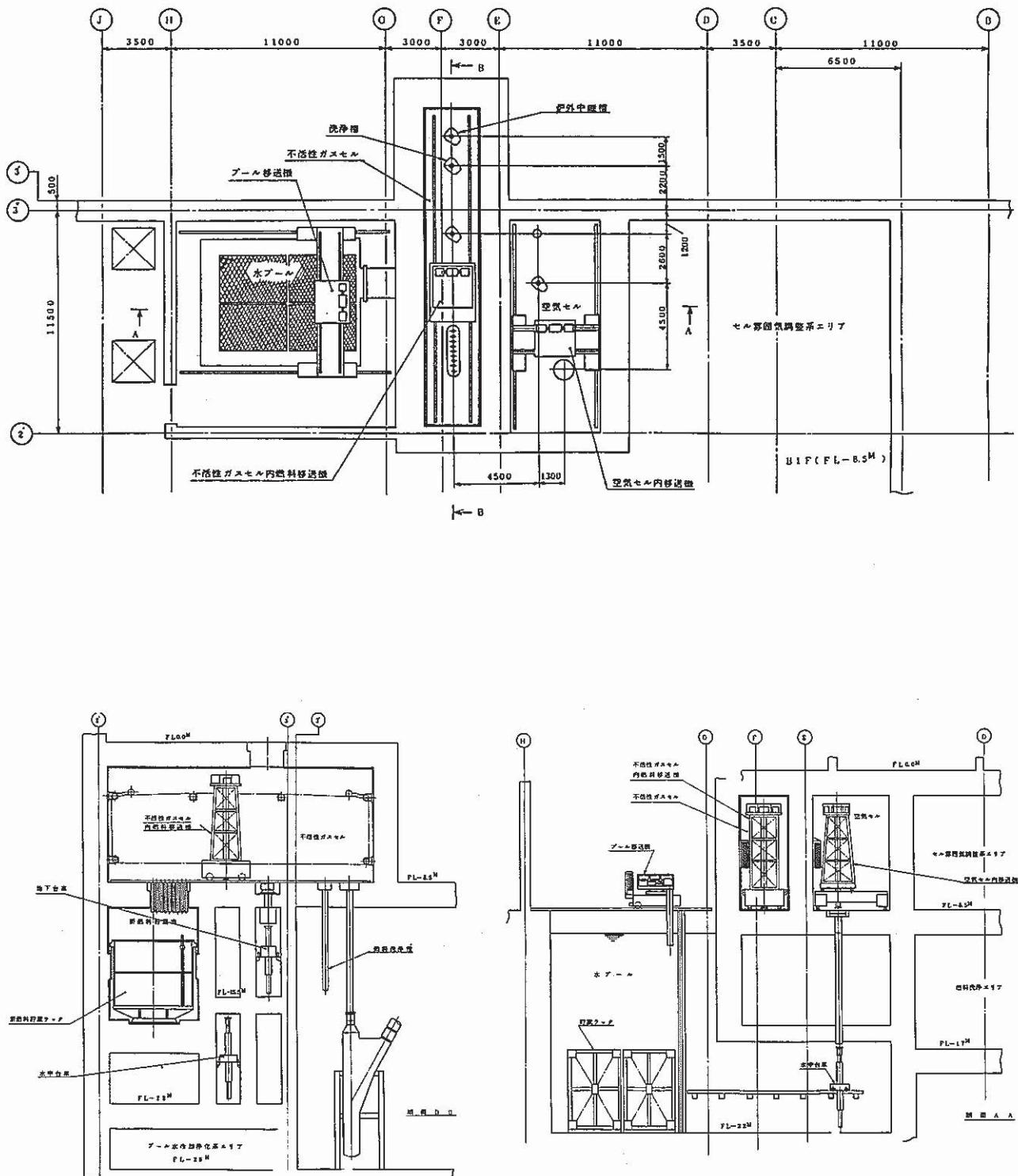
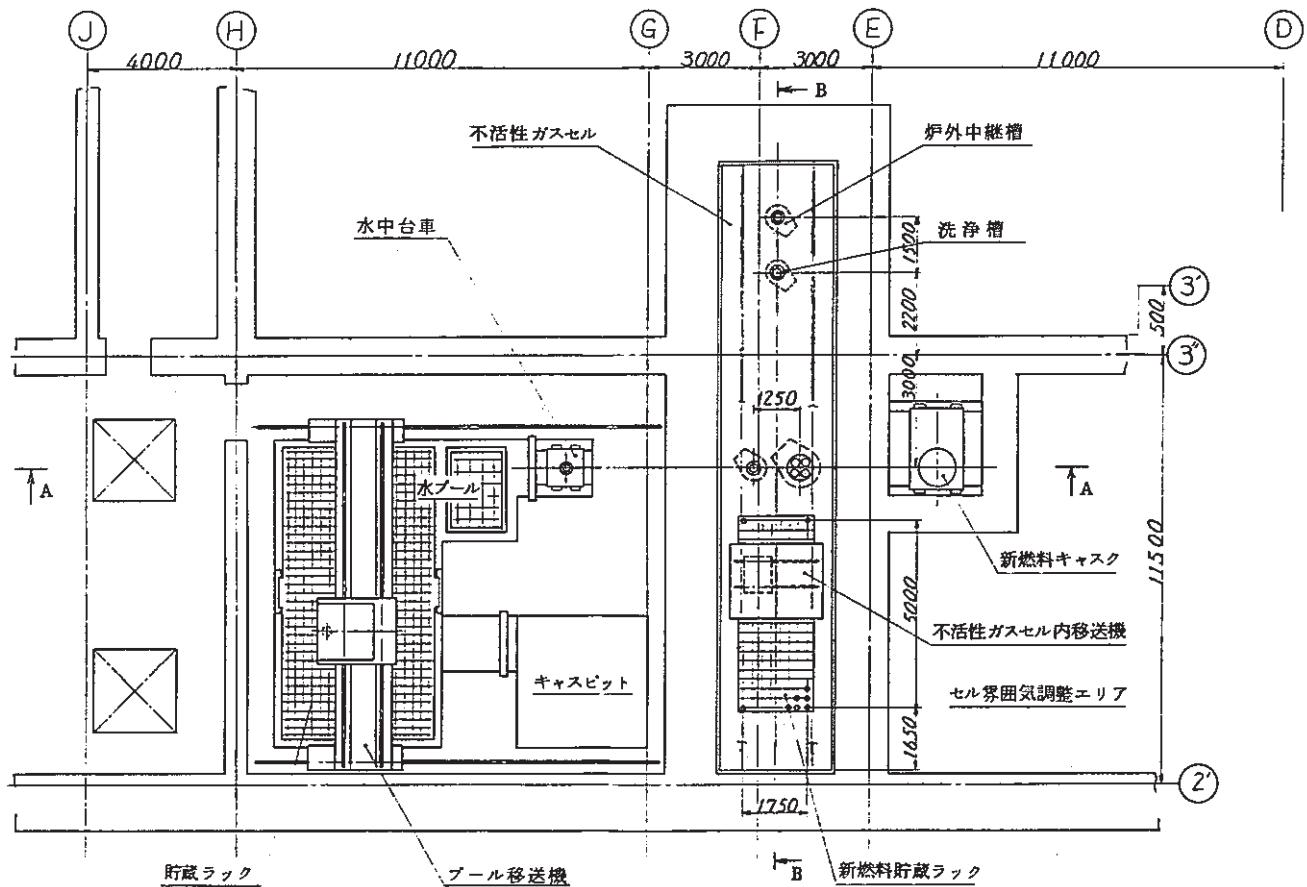


図 3.2-2 燃料取扱系配置図 (60 年度)



燃料取扱設備配置計画図

(F.L. - 8.5M)

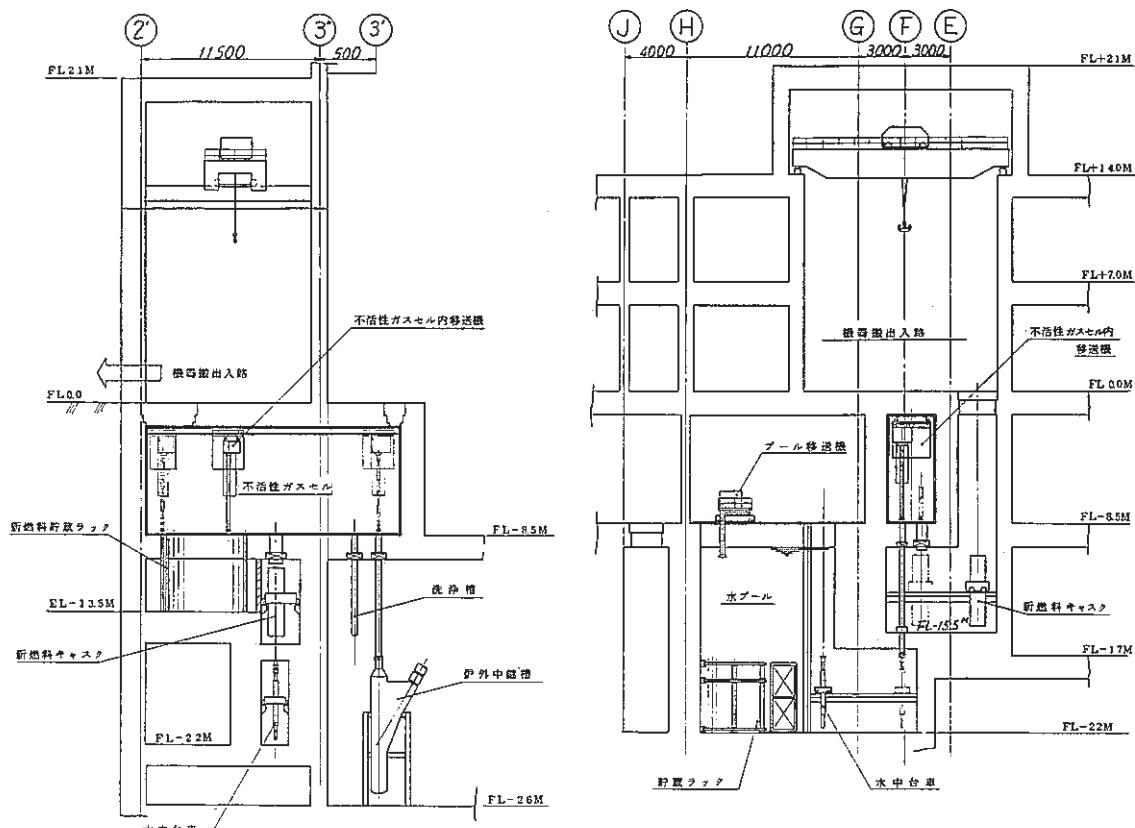


図 3.2-3 燃料取扱系配置図

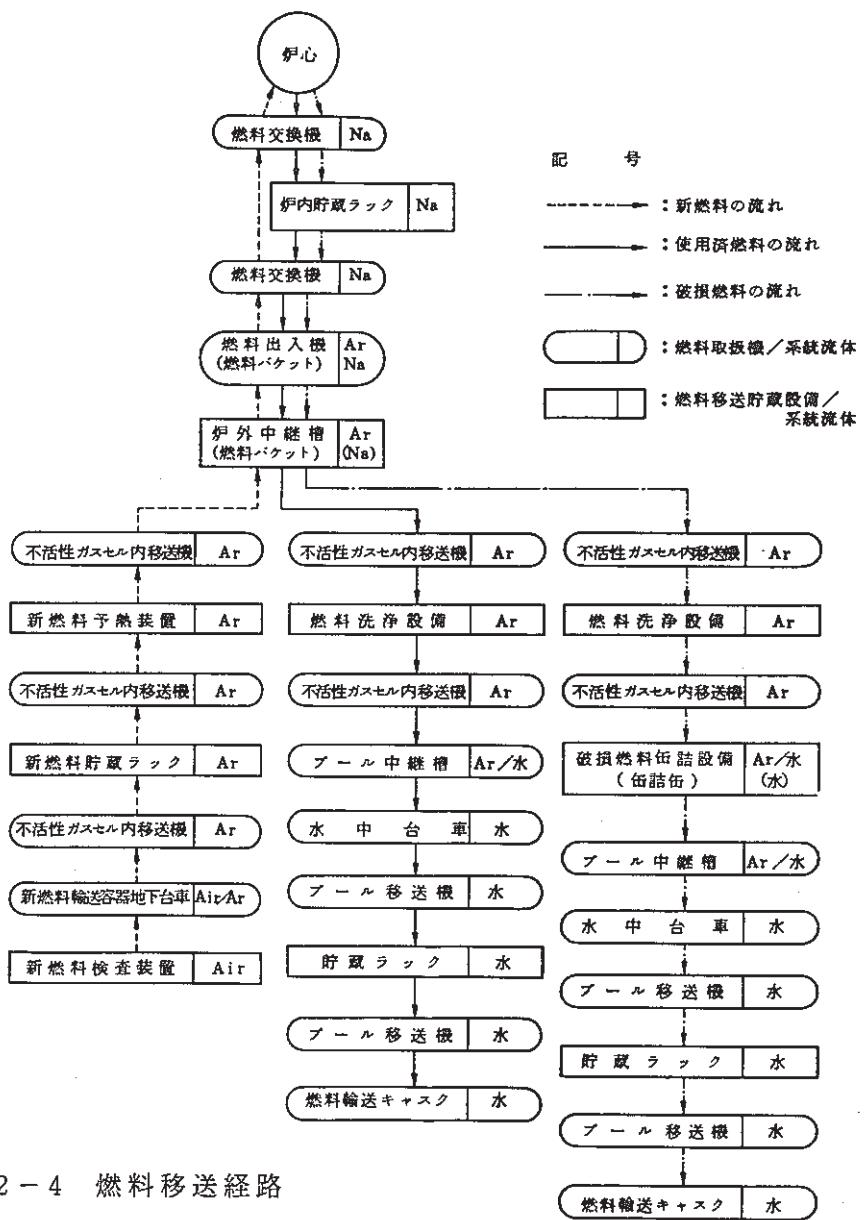
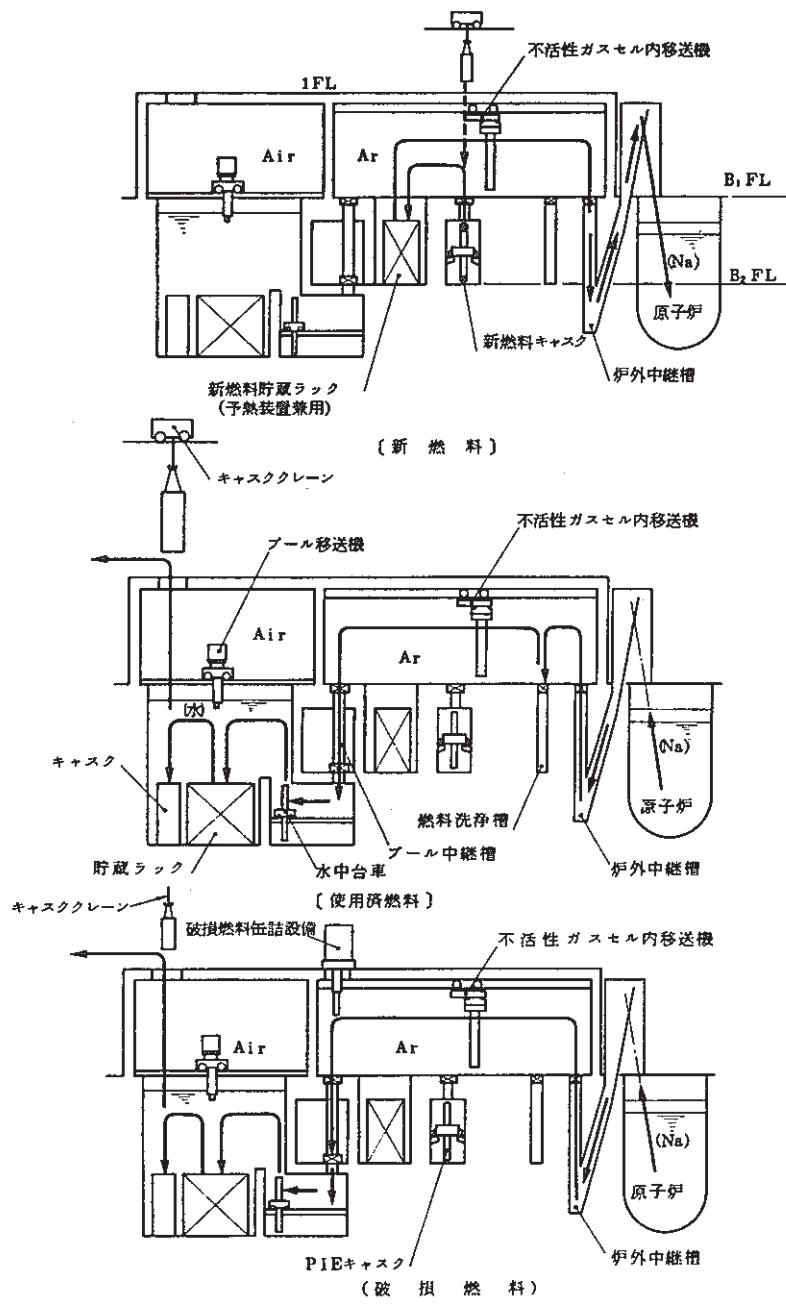


図 3.2-4 燃料移送経路

走行速度 高速 12m/min 低速領域動作開始後 5秒、停止前 10秒
昇降速度 高速 15m/min 低速 1.5m/min (着地・低速領域)

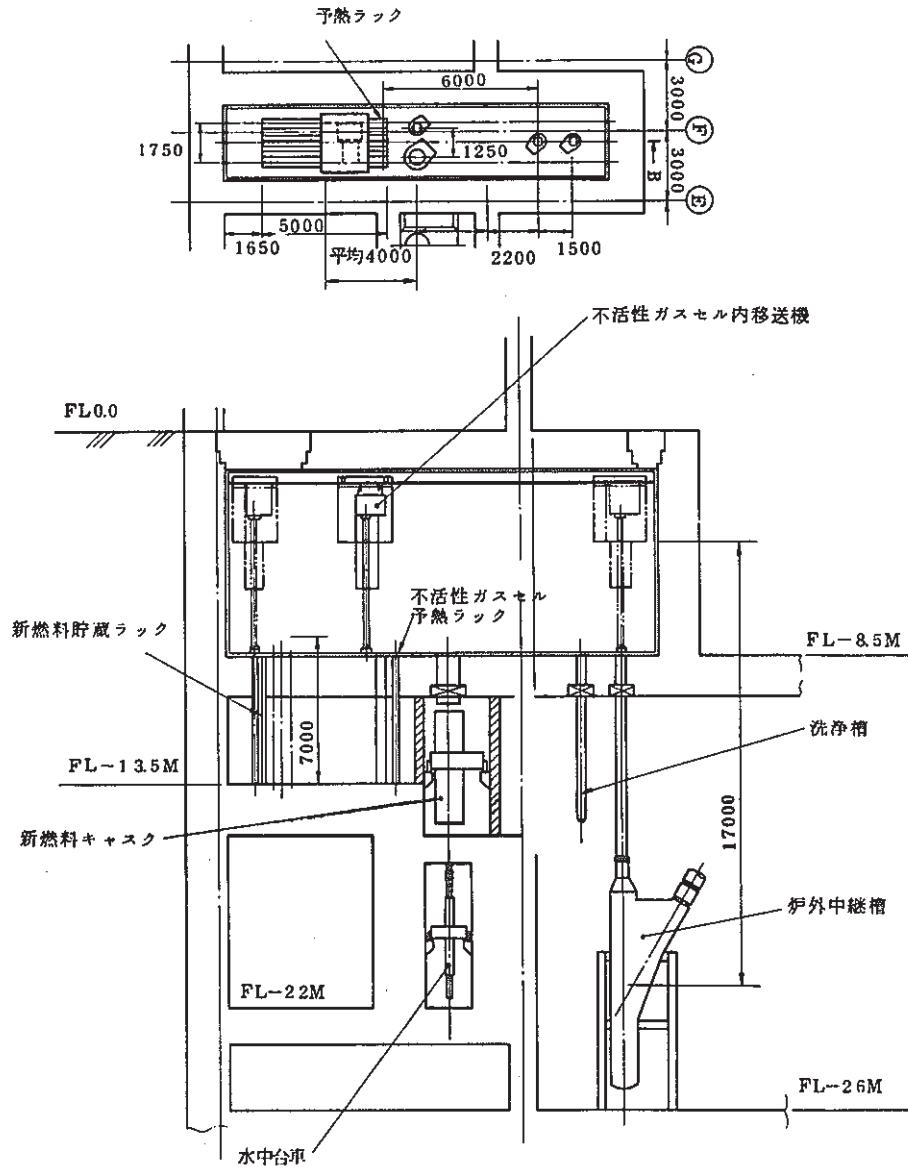


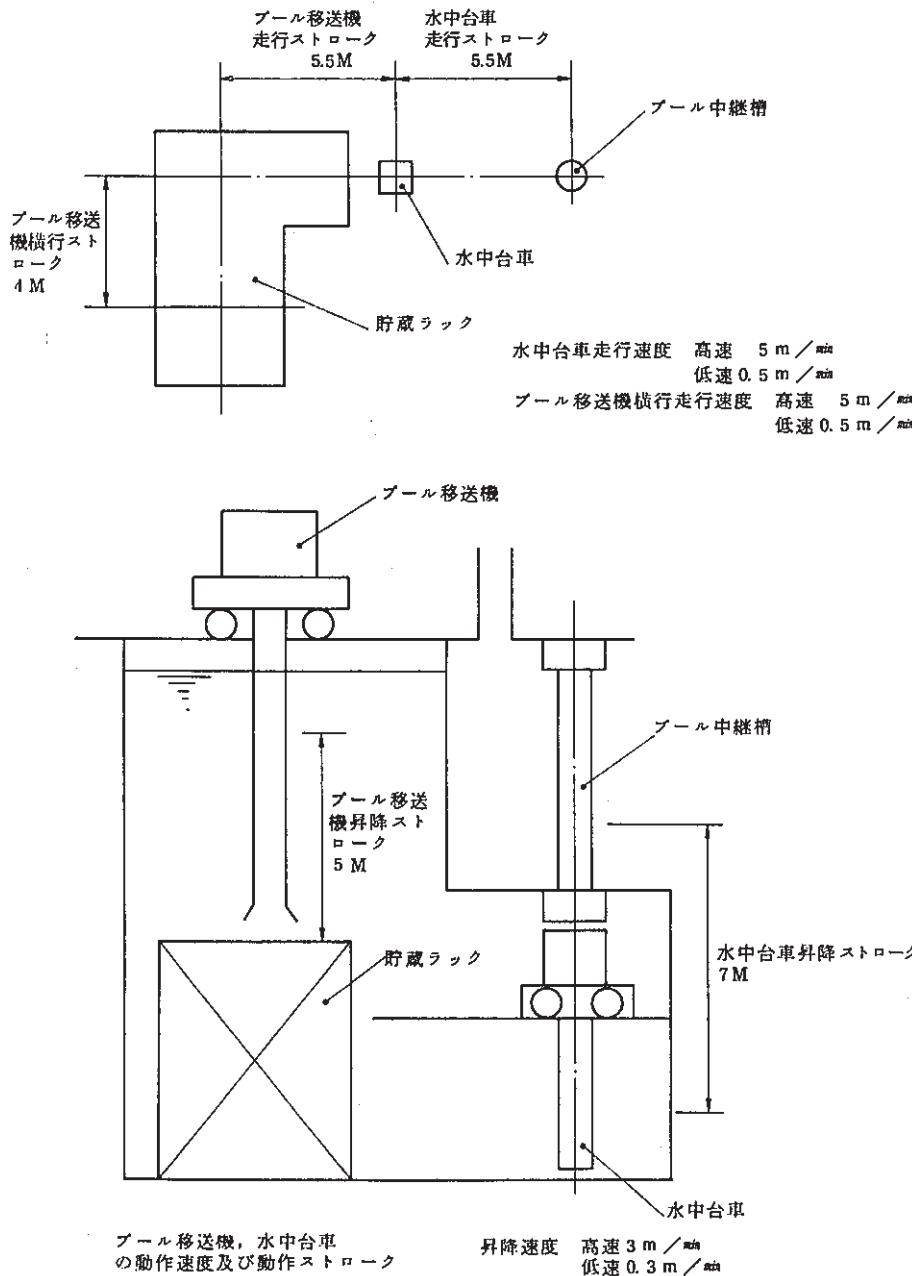
図 2.2-5 不活性ガスセル内移送機の動作速度及び動作ストローク

表 2.2-1 不活性ガスセル内移送機の動作ストロークとユニット動作時間

| 項 目 | 動作ストローク (m) | | | ユニット動作時間 (分) | | |
|------------|-------------|-----|------|--------------|------|------|
| | 高 速 | 低 速 | 合 計 | 高 速 | 低 速 | 合 計 |
| 走 行 | | | | 1.5 | 0.13 | 0.25 |
| ① 炉外中継槽 | | | | | | |
| ② 燃料洗浄槽 | | | | 6.0 | 0.50 | 0.25 |
| ③ 新燃料予熱ラック | | | | | | |
| ④ 新燃料貯蔵ラック | | | | 7.5 | 0.63 | 0.25 |
| ⑤ 新燃料貯蔵ラック | | | | | | |
| ⑥ 炉外中継槽 | | | | | | |
| ⑦ 新燃料予熱ラック | | | | | | |
| 注 1 | | | | | | |
| ⑧ ブール中継槽 | | | | 1.1 | 0.92 | 0.25 |
| ⑨ 新燃料貯蔵ラック | | | | | | |
| ⑩ 新燃料貯蔵ラック | | | | | | |
| ⑪ 炉外中継槽 | | | | | | |
| グリップ昇降 | | | | | | |
| ⑫ 上昇 | 1.7 | - | 1.7 | 1.42 | - | 1.42 |
| ⑬ 下降 | 16.7 | 0.3 | 17 | 1.39 | 0.25 | 1.64 |
| 上記以外 | | | | | | |
| ⑭ 上昇 | 7 | - | 7 | 0.58 | - | 0.58 |
| ⑮ 下降 | 6.7 | 0.3 | 7 | 0.56 | 0.25 | 0.81 |
| つまみ・はなし | | | | | | |
| ⑯ つかみ | - | - | - | - | - | 0.5 |
| はなし | - | - | - | - | - | 0.5 |
| 横行 | | | | | | |
| ⑰ 予熱ラック間 | 0.85 | - | 0.85 | 0.28 | - | 0.28 |
| グリップ昇降 | | | | | | |
| ⑱ 予熱ラック | | | | | | |
| ⑲ 上昇 | 1 | - | 1 | 0.07 | - | 0.07 |
| ⑳ 下降 | 0.7 | 0.3 | 1 | 0.05 | 0.25 | 0.3 |

注 1 : 横行は走行と同時動作

図 3.2-5 不活性ガスセル内移送機の動作速度、動作ストローク及びユニット動作時間



プール中継槽、水中台車とプール移送機の動作ストロークと
ユニット動作時間

| 機器 | 項目 | 動作ストローク (m) | | | ユニット時間 (分) | | | |
|-----------------------------|-----------|------------------------|-----|-----|------------|------|------|------|
| | | 高 速 | 低 速 | 合 計 | 高 速 | 低 速 | 合 計 | |
| 水中台車 | 走行 | プール中継槽 ↑ 貯蔵ラック ㉑ | 4.9 | 0.6 | 5.5 | 0.98 | 1.2 | 2.18 |
| | 昇降 | 燃料昇降機 ㉒ 昇降 | 6.7 | 0.3 | 7 | 2.23 | 1.0 | 3.23 |
| 水 プ ール 移 送 機 | 走行 | 水中台車 ↑ 貯蔵ラック ㉓ | 4.9 | 0.6 | 5.5 | 0.98 | 1.2 | 2.18 |
| | 横行 | 同 上 ㉔ | 3.4 | 0.6 | 4 | 0.68 | 1.2 | 1.88 |
| グリッパ 昇降 | グリッパ上昇 ㉕ | 5 | - | 5 | 1.67 | - | 1.67 | |
| | グリッパ下降 ㉖ | 4.7 | 0.3 | 5 | 1.57 | 1.0 | 2.57 | |
| つかみ はなし | つかみ ㉗ | - | - | - | - | - | 0.5 | |
| | はなし ㉘ | - | - | - | - | - | 0.5 | |
| 中水 プ ール 継 槽 | ドアバルブ 開 ㉙ | - | - | - | - | - | 0.5 | |
| | ドアバルブ 閉 ㉚ | - | - | - | - | - | 0.5 | |

図 3.2-6 プール中継槽、水中台車及びプール移送機の動作ストロークとユニット動作時間

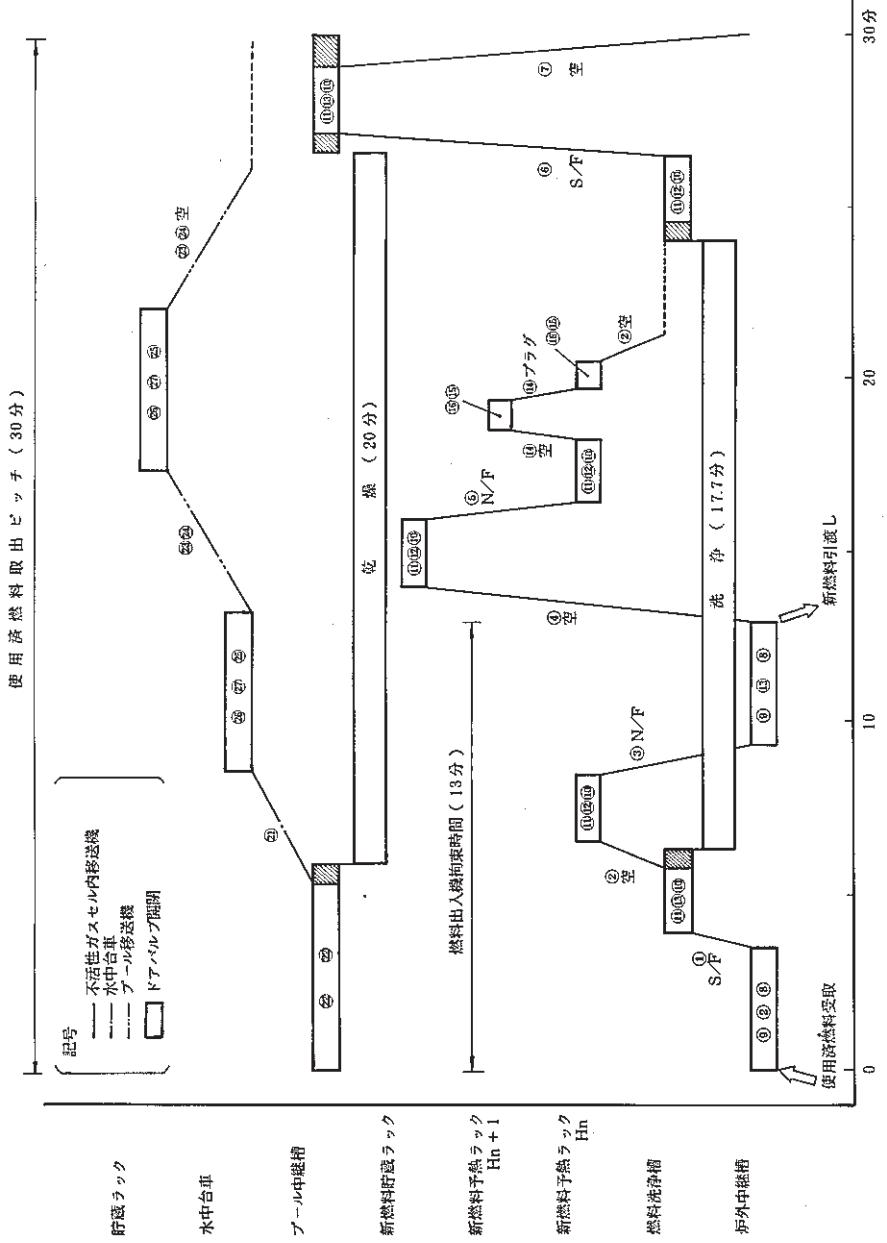
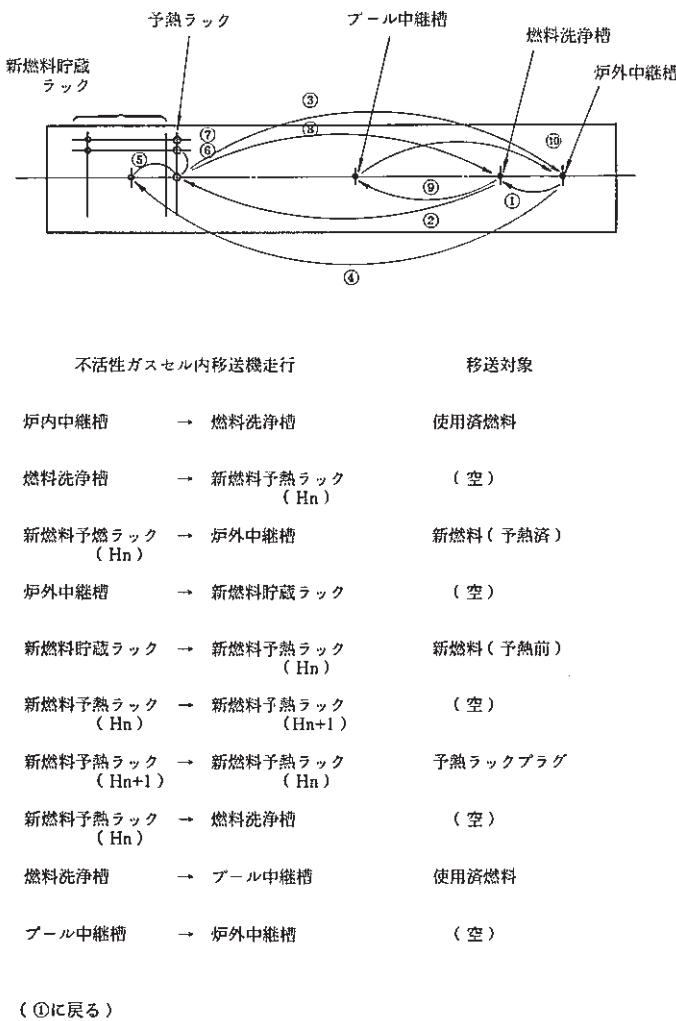


図 3.2-7 燃料取扱スケジュール



炉外燃料移送手順

3.3 プール中継槽に係る検討

3.3.1 プール中継槽

プール中継槽は移送セルから貯蔵プールへの燃料の引渡しに係る中間セル、地下台車等の設備を合理化するため、移行セルと貯蔵プール間を連通する案内管により燃料の引渡しを行う概念である。プール中継槽概念の検討に当ってはセル雰囲気への影響に主眼をおいて方式の選定を行い、系統概念の具体化と成立性の評価を行った。あわせて今後の課題を摘出した。

(1) プール中継槽に要求される機能

プール中継槽に要求される機能は、

① 湿分隔離機能

移送セルへの湿分の移行を防止できること。

② 燃料の一時保持・開放機能

セル側、水中移送室側の両移送機間の引渡しの際に、移送管内で燃料を一時保持、開放する機能を有すること。

③ 燃料の昇降ガイド機能

セル側、水中移送室側の両移送機による燃料の昇降動作中、昇降をガイドする機能を有すること。

であり、湿分隔離性能を評価する上ではアルゴンガス移送セル中の湿分条件を数 ppm に想定する。また燃取スケジュールとしては、設備全体の条件より決定されるが、除湿時間等を評価する上では10~15分の燃料受入間隔に対応できるものとした。

(2) プール中継槽方式の設定

前記の機能条件を満足するプール中継槽の系統概念について、燃料受入時(ドアバルブ開)の状態で移行セルへの湿分移行防止にかかる概念の異なる2方式について、構成機器及びセル雰囲気への影響の観点から比較検討を行った。その結果を表3.3-1に示す。

構成機器の面では、中継槽内の除湿装置を設けない分、方式1が簡素化されているが、セル雰囲気への影響が大きいためセル側の雰囲気調整系で除湿対応をする必要がある。方式2では、小体積の中継槽のみを除湿、乾燥すれば良く、セル雰囲気の影響もないため方式2を選定した。本方式の系統構成は図3.3-1に示すように、案内管及びドアバルブ及びドアバルブからなる中継槽本体、圧力調整装置、除湿装置からなっている。

プール中継槽本体は、移送セルと水中移送室を連通する燃料昇降案内管で両端にドアバルブを有している。またセル内移送機から水中移送機への燃料引渡しのため、案内管下部に燃料保持・引渡し機構を持たせている、図3.3-2にプール中継槽構造概念図を示す。ここで、プール中継槽の内径(220 mm)は燃料外径173.8 mmをガイドできるよう、また全高(約7300 mm)はプール中継槽として必要な最小値からそれぞれ設定した。

圧力調整装置は、水中移送室側ドアバルブ開放時にプール中継槽へのプール水侵入を防止

するため、プール中継槽内の圧力調整を行うものである。本装置の設定圧力は、水中移送室側ドアバルブ開放時のプール中継槽内設定水位とプール水位を差による水頭圧から 0.60kg/cm²Gとした。

除湿装置は、水中移送室への燃料受渡しに伴い、プール中継槽内に移行した湿分を循環フローにより除湿、乾燥し、次の燃料受取り時の移送セル側ドアバルブ開放による湿分の移行を防止するものである。除湿方式としては、排ガスの発生を少なくするため循環方式とした。また除湿原理としては吸湿材による方式及び圧縮冷凍方式が考えられるが、吸湿材の場合は性能が経時的に低下し再生が必要となるのに対し、後者の場合は湿分は凝縮水として回収されて安定した性能が常時得られ、再生等による2次排ガスの発生もないため圧縮冷凍方式とした。

(3) 湿分隔離性の検討

プール中継槽中の除湿性能については、移送セル中の湿分条件を数ppmに想定しているので、その条件に影響を与えないためには、プール中継槽内をそれと同程度以下に除湿できることが必要である。

圧縮冷凍方式の除湿装置では、大気圧露点温度 -20~30°C (数百ppm) 程度の除湿が限界であるが、これに循環運転による乾燥・除湿の後、ガス供給系からの乾燥 Ar (セル中と同様に数ppm程度の湿分量) とガス置換を行うことによりセル側雰囲気 (数ppm) と同程度以下にすることは可能であると考えられる。

ところで、除湿時間として燃料を水中移送室へ引渡した後、次の燃料受入れまでに10~15分を設定したが、この間にプール中継槽内の除湿乾燥を終了する必要がある。燃料が水中に入る際には、燃料表面で蒸発した蒸気は結露水の形でプール中継槽内面に付着するが、この乾燥のための時間が除湿時間を律速する。

ここで、下式により乾燥時間を検討する。本式はガス中への水分蒸発による乾燥速度を示すもので被乾燥体が熱風のみから受熱する場合に適用できる。

$$R_c = h (t - t_w) / \lambda_w$$

$$h = 0.0516 C_p G^{0.8} / D^{0.2}$$

| | | |
|----------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Rc | ； 乾燥速度 | (kg/hr · m ²) |
| h | ； 热伝達率 | (kcal/hr · m ² · °C) |
| t | ； ガス温度 | (°C) |
| t _w | ； 湿球温度 | (°C) |
| λ_w | ； t _w における蒸発潜熱 | (kcal/kg) |
| C _p | ； 定圧比熱 | (kcal/kg · °C) |
| G | ； 質量速度 | (kg/m ² · hr) |
| D | ； 管 内 径 | (m) |

ここで、循環ガス加熱器からの出口温度を70°C（除湿装置の効率を考えると70°C程度が最大である）、露点温度を-30°Cとすると、 $t_w = 2.8^\circ\text{C}$ 、 $\lambda_w = 582 \text{ kcal/kg}$ である。プール中継槽内径を0.22m、Arガスの比熱を0.124 kcal/kg°C、密度を1.8 kg/m³とすれば、

$$R_c = 4.1 \times 10^{-3} \times Q^{0.8} \quad (\text{kg/hr} \cdot \text{m}^2)$$

Q ：流量 (Nm³/hr)

を得る。

プール中継槽表面に付着する給露水の量は、燃料が水中移送室に入る際の水分蒸発量、プール中継槽内面の粗さ等の条件で決まるが、相当高温の燃料が水中へ降下し大量の水蒸気がプール中継槽へ移行結露したとしても、プール中継槽は垂直に設置されているため結露した水滴はほとんどが自重によりプール中継槽からドレンされる、自重ドレン後に金属表面に付着する水分量を評価する場合、一様に0.1 mmの厚さで水層が形成されるとすれば裕度を持った評価ができる。プール中継槽内面積は4.1 m²であるから410 gの水分量となり、この量を10分で乾燥するための乾燥速度は

$$R_c = \frac{0.41 \text{ (kg)}}{0.17 \text{ (hr)} \cdot 4.1 \text{ (m}^2\text{)}} = 0.59 \text{ (kg/hr} \cdot \text{m}^2\text{)}$$

であるから、必要流量は約8 Nm³/minである。

これは一般的な除湿装置で十分実現可能な流量であり、燃取スケジュールを考慮した10~15分での除湿、乾燥の見通しは得られたものといえる。

ただし、今後次の点を検討する必要がある。

① 濡分の発生量の評価

乾燥時間、循環流量等の確認のため、燃料の水中移送室への移送時に発生する蒸気量、プール中継槽内面への付着量等を実験的に確認する必要がある。

② プール中継槽中の除湿・乾燥を効果的に行うためプール中継槽の内面構造、ドアバルブ、燃料保持、引渡し機構等の構造を水滴が残りにくい構造にする必要がある。

3.3.2 水中台車

水中台車は、不活性ガスセルからの燃料搬出経路を短縮するために設置された不活性ガスセルと水中移送室を中継するプール中継槽に整合し、プール中継槽の下流に燃料の受渡し機能を備えた水中移送機であり、プール中継槽～プール移送機間で燃料の移送を行うものである。ここでは、水中台車構造の案出とその成立性の評価を行ない、プール中継槽との適合条件を明らかにするとともにこのための課題を摘出した。

一般に、燃料を下方に受渡す方法としては、表3.3-2に示すように吊下げる、下方から受取りに行く、及び自然に落下させる方法がある。また駆動方法としては水圧、空圧及び電動駆動がある。受渡し方法のうち吊下げる方法には、不活性ガスセルからとプール中継槽上部から

とがあるが、不活性ガスセルからの場合は不活性ガスセルと水中移送室がつながり、水分が不活性ガスセルに移行する。また、プール中継槽上部に取付けた場合は、上方のスペースが大きくなることなどから吊下げる方式は不利であり、受渡し方法としては下方から受取りに行く及び自然に落下させる方式から選定することにした。

一方、駆動方法としては雰囲気が水であることから水圧方式、また機械的駆動ができる電動方式から選定することにした。

以上の受渡し方法及び駆動方法の組合せから表 3.3-3 に示すローラーチェーン昇降機構方式、シリンダー昇降機構方式及び軟着地機構方式の 3 方式について、その比較検討を行った。この結果、現状においては信頼の高い動作が可能であり、また異常時の対応が容易であるなど問題点が少なく、かつ実現性の高いローラーチェーン昇降機構方式を選定した。なお、シリンダー昇降機構方式は今後の R&D によって長ストロークシリンダ機能が確認されれば台車部構造が簡単であり、かつ壁貫通の駆動軸とその駆動装置（シリンダーと給・排気配管のみで構成される）が簡素化されるため、将来有望な概念になり得るものと考えられる。

図 3.3-3 に水中台車構造概念図を示す。

表 3.3-1 プール水中継槽系統概念の比較

| No. | 方 式 | 系 統 概 念 | 構成機器 | セル芬囲気への影響 | 評 価 |
|-----|--|---|---|---|---|
| 1. | <p>燃料受取 上部ドアバルブを開放し、使用済燃料を受取り、シールプラグに固定する。</p> <p>注水 上部ドアバルブを閉め、移送セルと隔離した後、中継槽内にプール水を導く。</p> <p>燃料受渡し 水中移送機によりシールプラグごとプール移送機受渡し範囲まで移送する。</p> <p>排水 水中移送機によりシールプラグを中継槽に接続した後 Ar 加圧によりプール水を排出する。</p> <p>待機 槽内を減圧し、次の受取を待つ。</p> | ① ドアバルブ ② 案内管 ③ シールプラグ ④ 加・減圧ライン ⑤ 注排水ライン | 注水時に燃料表面で発生する水素 (Na:水反応) 及び水蒸気は、上部空間に残留し、減圧によるバージ後も約 6 割が中継槽に残る。 セル芬囲気への影響は H ₂ : 残留 Na(26g) のすべてが反応したとして約 0.3 mol の移行 (0.6g) H ₂ O: 中継槽内の飽和蒸気のみ移行するとしても約 1.3 mol の移行 (23.4g) | セル芬囲気は H ₂ : 120 ppm 上昇 (Vol.) H ₂ O : 530 ppm 上昇 (Vol.) | 使用済燃料 1 本を処理するごとに左記の様なセル芬囲気の悪化があり、その湿分等を除去するためには大容量の除湿装置が必要となる。 |
| 2. | <p>燃料受取 上部ドアバルブを開放し、使用済燃料を受取り、保持機構に固定する。</p> <p>加圧 Ar ガスにより中継槽内を加圧し、下部ドアバルブを開く。(プール水は侵入しない)</p> <p>燃料受渡し 水中移送機により燃料が抜き出された後、下部ドアバルブを閉じる。</p> <p>待機 中継槽を減圧し、循環ガスフローにより、除湿・乾燥を行い、次の受取りを待つ。</p> | ① ドアバルブ ② 案内管 ③ 保持機構 ④ 除湿装置 ⑤ 調圧装置 | 除湿性能が確保できれば、セル芬囲気に影響は与えない。 | 小容量の中継槽内での除湿乾燥である為、効率的な湿分除去が可能である。 下部シールもドアバルブとしているため、燃料受渡し後ただちに除湿工程に入れるので、燃取スケジュール上有利な構造となっている。 | |

表3.3-2 燃料の受渡し方法

○: 採用可
×: 採用否

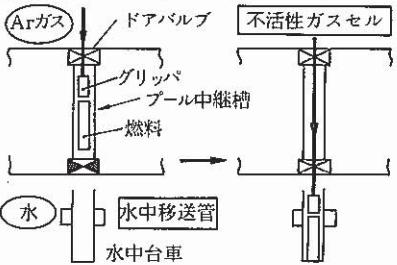
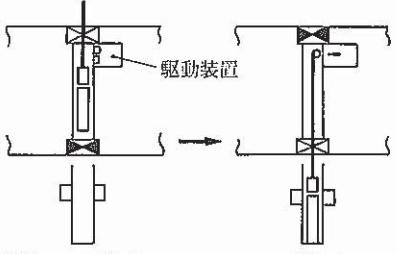
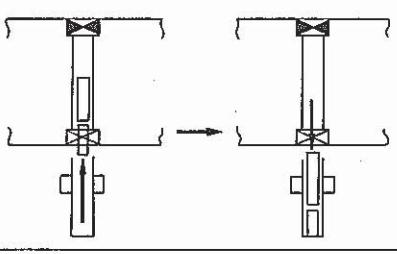
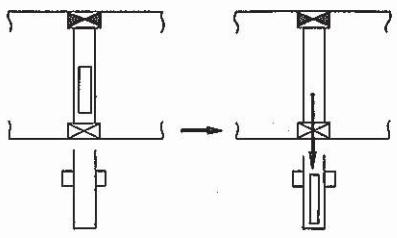
| | 受渡し方法 | 駆動方法 | 問題点 | 採用可否 |
|----|--|--------------|---|------|
| 1. | <u>吊下げる</u>  | | <ul style="list-style-type: none"> ① 水中移送室と不活性ガスセルがつながるためセル内へ水分が移行しやすくなる。よって、水分移行防止対策が必要となる。 ② プール中継槽内水面は、燃料プールと同じレベルまで上るのでプール中継槽内水分除去容量、時間が増加する。 | × |
| 2. | <u>吊下げる</u>  | 電水圧 | <ul style="list-style-type: none"> ① プール中継槽上方に駆動装置が必要となる。 ② 駆動装置が付くため、上方のスペースが大きくなり、プール中継槽内ガスピリウムが増加し、除湿容量、時間が増加する。 | × |
| 3. | <u>下から受取りに行く</u>  | | <ul style="list-style-type: none"> ① 燃料の位置が下方にあること。上方にある場合、受取りに行くグリッパの長さが長くなり水中台車の高さが高く必要となる。 ② 水分の移行は、プール中継槽を常時加圧しておくことにより、水面を下げられ少なく出来る。 但し、加圧設備が必要となる。 | ○ |
| 4. | <u>自然に落下させる</u>  | なし (自然落下) | <ul style="list-style-type: none"> ① 落下距離を出来る限り小さくする必要がある。 ② プール中継槽内は、常時加圧または常圧の状態で可能であるが、不活性ガスセル内への水分移行、除湿容量、時間を考慮した場合加圧にした方が良い。 | ○ |

表3.3-3 水中台車方式選定

◎: 他と比べ実現性大
○: " " 中
△: " " 小

| No. | 燃料受渡し方式 | 構造概念 | 構成機器 | 問題点 | 評価 |
|-----|--------------------|---|--|--|---|
| 1. | ○ローラチェーン 昇降機構方式 | <ul style="list-style-type: none"> ○昇降機構にローラチェーン等を用い先端に燃料昇降機を取り付け燃料を昇降する。昇降駆動は、壁の外より継手を介して行なう。 ○水平移動は、台車で行なう。 ○駆動は、プール外よりチェーン等を介して行なう。 | ① 燃料昇降機 ② 昇降機構 ③ 昇降駆動装置 ④ 台車と走行駆動装置 | <ul style="list-style-type: none"> ○昇降駆動のための接続構造 ○昇降位置検出構造 | ◎ <ul style="list-style-type: none"> ○他方式に比べ、現状の技術で実現できる。 ○シリンダー昇降機構方式に比べ昇降駆動部が複雑になる。 |
| 2. | ○シリンダー 昇降機構方式 | <ul style="list-style-type: none"> ○昇降機構にシリンダーを用い、燃料を昇降する。昇降駆動は、壁の外より継手を介して行なう。 | ① 昇降シリンダー ② 昇降駆動装置 ③ 台車と走行駆動装置 | <ul style="list-style-type: none"> ○長ストロークシリンダー機能 ○昇降駆動のための接続構造 ○昇降位置検出構造 | ○ <ul style="list-style-type: none"> ○ローラチェーン昇降機構方式に比べ、台車まわり及び貫通の昇降駆動軸及びその駆動系（シリンダーと給・排水配管のみ）構造が簡単になる。 ○長ストロークシリンダー機能がR/D等によって確認されれば、将来有望な概念となる。 |
| 3. | ○軟着地機構 方式 | <ul style="list-style-type: none"> ○台車にダンパと緩衝器を取り付け燃料を上方から落下させて台車に受渡す。 ○水平移動は、No.1と同じ方法で行なう。 | ① ダンパ及び緩衝器 ② 台車と走行駆動装置 | <ul style="list-style-type: none"> ○ダンパ構造 ○ダンパストロークが長く必要となり台車の上下スペースがNo.1, No.2より大きく必要。 ○昇降位置検出構造。 ○異常昇降時のために他に駆動系が必要。 | △ <ul style="list-style-type: none"> ○構造が複雑になる。また燃料の衝撃加速度を3Gにおさえるためには、緩衝ストロークが約2m必要となり、建屋へのインパクトが大きくなる。 ○昇降位置検出及び異常時の対応を考えた場合、No.1, No.2方式より不利である。 |

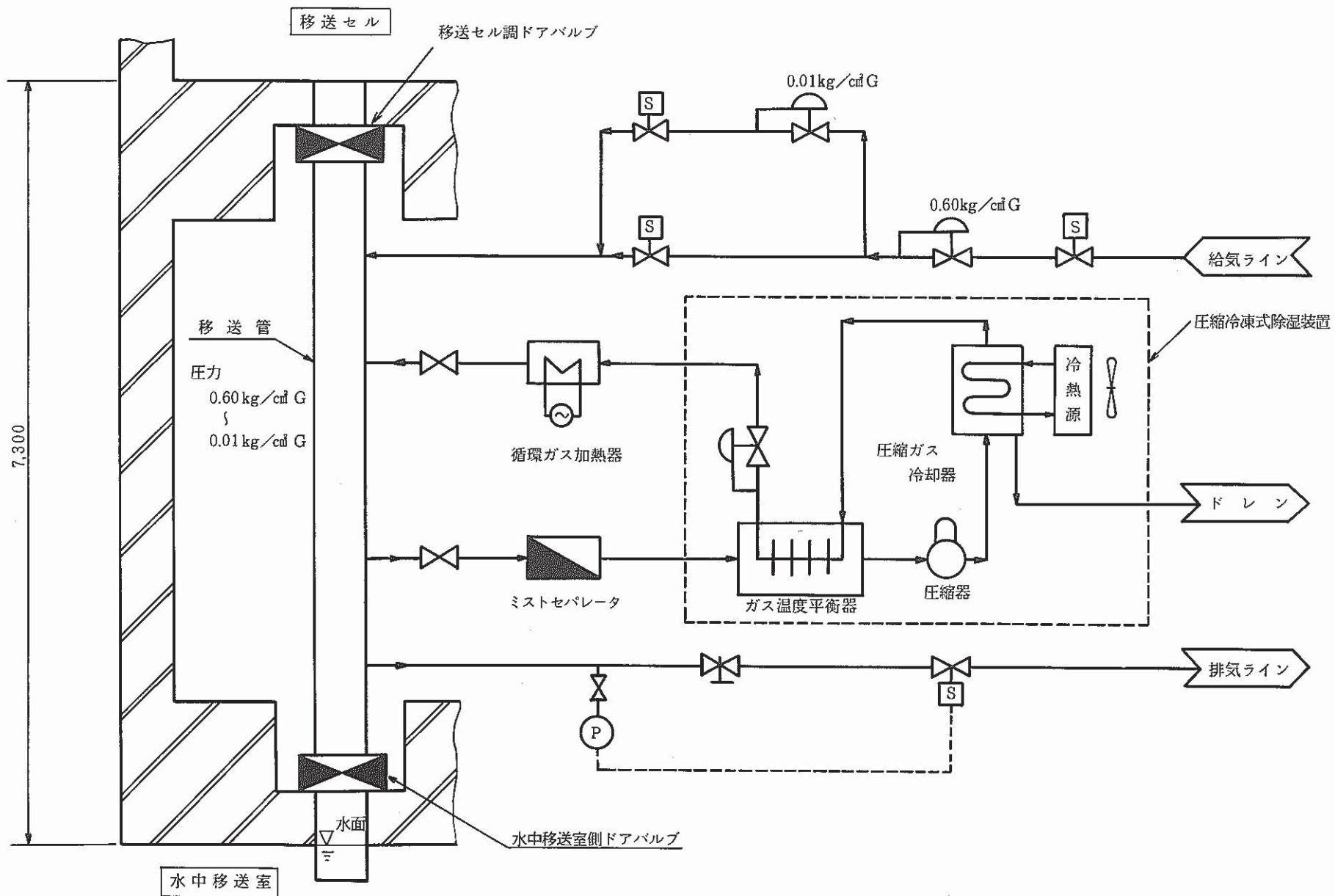


図 3.3-1 プール中継槽系統図

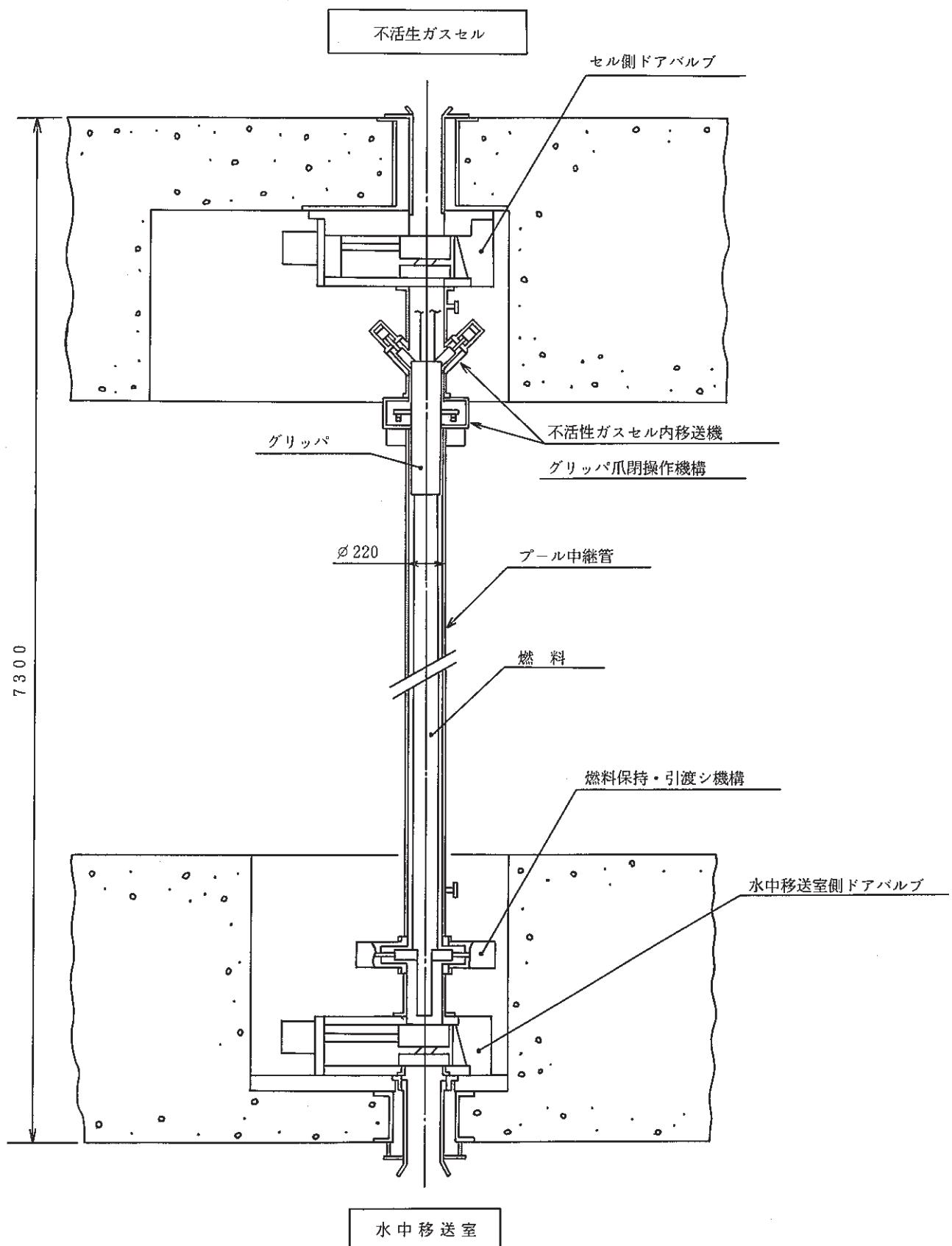


図 3.3-2 プール中継槽構造概念図

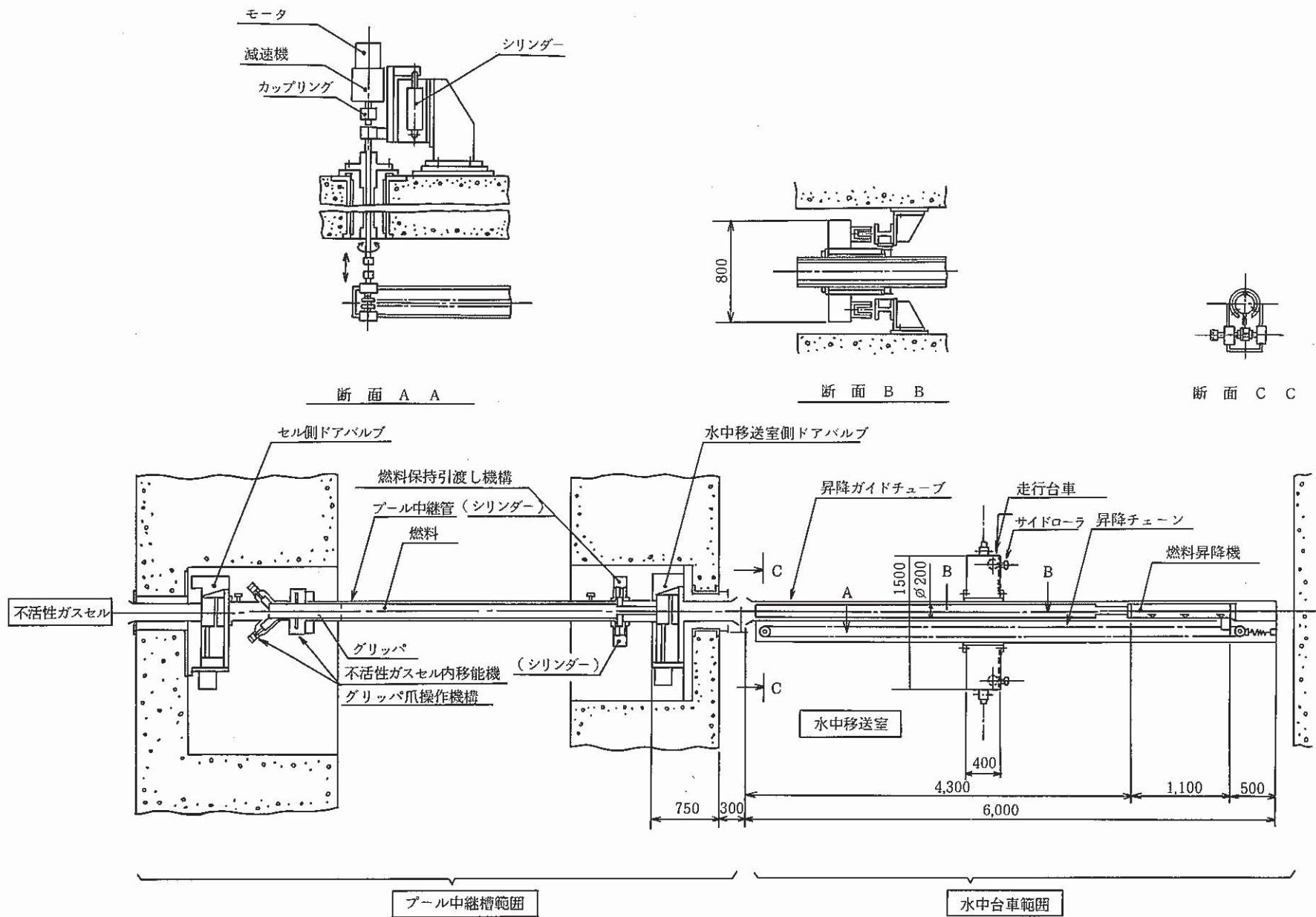


図3.3-3 水中台車構造概念図

3.4 使用済燃料貯蔵ラックの稠密化の検討

60年度設計で未臨界性評価上からの稠密化の可能性を示した層別貯蔵方式について、その効果と採用条件を明らかにするため未臨界性解析を実施した。

まず、使用済燃料貯蔵設備に関する臨界安全解析を行い、正方配列（裸貯蔵、無限配列）を基準ケースとし燃料間ピッチを検討した。次に、実際の設備は貯蔵される燃料集合体数が有限であることから、より実機に則した体系である「有限配列モデル」による検討を行った。さらに燃料組成が種々異なる高速炉燃料に対し稠密化貯蔵の方策として適用し得る「層別貯蔵」を取り上げ、燃料間ピッチを検討し貯蔵スペースの削減の程度を評価した。

(1) 検討内容

以下の各体系について燃料配列（最小2体間ピッチ）の検討を行う。

① 無限配列モデル（基準体系、図3.4-1）

② 有限配列モデル

③ 層別貯蔵モデル

・中心空領域なし（図3.4-2）

・中心空領域あり（図3.4-3）

以上の各体系の検討内容を表3.4-1に示す。

なお、層別貯蔵についてはプールを3領域に分割し、各領域に1バッチ分の燃料を貯蔵するものとする。その際、実効増倍率 K_{eff} を基準値以下に保つため各バッチ領域間には、水で満たされた空領域を設けるものとし、この空領域寸法についても検討を行った。

(2) 検討条件

① 臨界安全基準 通常時 $K_{eff} \leq 0.90$

事故時（偏心状態） $K_{eff} \leq 0.95$

② 燃料組成

| | | |
|---------|---------------------------------------|----------|
| ・内側炉心燃料 | Pu 富化度 ($PuO_2 / (PuO_2 + UO_2)$) | 16.3 w/o |
|---------|---------------------------------------|----------|

| | | | |
|---------|---|---|----------|
| ・外側炉心燃料 | 同 | 上 | 21.2 w/o |
|---------|---|---|----------|

| | | |
|------------|---------------|---------|
| ・径プランケット燃料 | ^{235}U 含有率 | 0.3 w/o |
|------------|---------------|---------|

これらはいずれも新燃料についての燃料組成である。使用済燃料貯蔵設備では、内側炉心燃料及び外側炉心燃料は燃焼が進むにつれて Pu 量は低減する。

一方、径プランケット燃料中には燃焼に伴い Pu が生成される。ただし、生成される Pu 量は、 Pu 富化度の最も高い外側炉心新燃料を上まわることはないと考えられるため、「無限配列」及び「有限配列」の検討においては、貯蔵する燃料をすべて外側炉心新燃料とする。

「層別貯蔵」の場合、昨年度の検討結果から、燃焼に伴う炉心燃料の Pu 量の低減と径プランケット中の生成の度合は、体系の実効増倍率に対してほぼ相殺する程度であることが確認されており、本解析においては上記新燃料の組成を用いるものとする。

③ 燃料貯蔵本数

以下に示す 3 バッチ分の炉心構成要素を貯蔵し得る体系とする。

| | |
|------------|-------|
| ・内側炉心燃料 | 223 体 |
| ・外側炉心燃料 | 132 体 |
| ・径プランケット燃料 | 114 体 |
| ・制御棒 | 11 体 |

④ 解析手法

無限配列については、「WIMS」コードを用いて解析を行う。

⑤ 層別装荷（中心空領域あり）体系の空領域決定方法

層別装荷（中心空領域あり）体系の空領域寸法は、本検討に用いた条件のうち燃料装荷本数が各燃料集合体の種類ごとに定まった値であることから、以下の手順によって図 3.4-3 に示すとおり決定される。

イ. 層別貯蔵は、体系の実効増倍率を低減する観点から検討を行っている貯蔵方法である。

体系の中心から各燃料集合体の配列順序は、昨年度検討結果及び本年度実施の（中心空領域なし）体系の検討結果から決定され、外側炉心燃料集合体を最外周に装荷した場合が最も実効増倍率が低減される。

ロ. 外側炉心燃料集合体は、Pu 富化度が最も高いため 2 層以上にすると体系全体の反応度を高める結果になる。また、漏洩量を増大させ、反応度の低減をはかるため長方形に配列する必要がある。

ハ. 以上から、外側炉心燃料集合体配列を外周に 1 列とし、かつ内側炉心燃料集合体及び径プランケット燃料集合体をその内側に装荷する配列方法は、外側炉心燃料本数によって図 3.4-3 に示されるように決定される。このとき、体系中心部に燃料集合体を装荷しない領域が生じ、この領域がいわゆる「空領域」である。

(3) 検討結果

① $K_{eff} \leq 0.95$ を満足する燃料 2 体間最小ピッチは次の通りとなった。

イ. 無限配列の場合（図 3.4-4）：正方配列 230 mm

ロ. 稠密化検討（図 3.4-5）

- ・有限配列 : 正方配列 225 mm
- ・層別配列（中心空領域なし）: 三角配列 225 mm
(正方配列 210 mm相当)
- ・層別貯蔵（中心空領域あり）: 三角配列 220 mm
(正方配列 205 mm相当)

② バッチ間空スペース

上記層別貯蔵（中心空領域なし）のケースを代表ケースとして、各バッチ領域間の空スペ

ースをパラメータとした解析を行った。結果を図3.4-6に示す。3領域に分割した各領域が1バッチ分の孤立系と k_{eff} が等しくなる空スペース寸法として25cmを必要とする。

(3) 層別貯蔵の稠密性評価

以上の①、②で得られた結果に基づき、燃料貯蔵領域が占める建屋の面積を比較することにより層別貯蔵の稠密性を評価した。図3.4-7に層別貯蔵(中心空領域なし)の場合、図3.4-8に層別貯蔵(中心空領域あり)の場合の稠密性評価の結果をそれぞれ示す。

無限配列を1.0とした時の層別貯蔵の燃料貯蔵領域面積は、それぞれ

- 有限配列 : 0.96
- 層別貯蔵(中心空領域なし) : 0.80
- 層別貯蔵(中心空領域あり) : 0.87

(中心空領域を除いた場合 : 0.73)

となり、層別貯蔵が稠密化に有効であることが確認できた。

特に、層別貯蔵(中心空領域あり)のケースは、中心空領域を制御棒等の貯蔵スペースとして利用する場合、建物スペースが最も有効に活用できる貯蔵方法である。なお、昨年度の検討結果からこのケースは、水抜け事故の際に中心空領域からの中性子の漏洩効果が大であり、潜在的安全性を有する貯蔵方法といえる。

(4) 結論

従来、一般に認知されている「無限配列モデル」によって臨界安全解析検討を行う場合、燃料2体間最小ピッチは正方配列で230mmである。

これに対し、模擬実験解析等により手法の妥当性を確認する必要は生じるが、有限体系によつて検討を行う場合、燃料2体間最小ピッチは正方配列で225mmとなる。さらに燃料の層別貯蔵概念は稠密化貯蔵に有用であり、中心に空領域を設けない場合、三角配列で225mmでも臨界安全基準を満足し、スペース的には無限配列の場合の80%の領域に3バッチ分の燃料を貯蔵できる。中心に空領域を設ける場合は、三角配列で220mm、スペース的には無限配列の87%(中心空領域を考慮すれば73%)で十分であることが確認できた。

表 3.4-1 未臨界性解析検討内容

| 稠密化の度合 | 解 析 体 系 | 解析に用いる燃料 | 体系モデルの内容 | 特 徴 |
|---------|-------------------------------|---|---|----------------------|
| 稠 密 化 ↓ | 無 限 配 列 | Pu富化度の最も高い燃料 (外側炉心新燃料) | 水平方向に無限に配列。水平方向には中性子の漏洩がないものとし、軸方向の漏洩はバックリングによって考慮。 | 先行炉における実績多数。 |
| | 有 限 配 列 | 同 上 | 貯蔵される燃料集合体数により体系を限定する。水平方向の中性子の漏洩も考慮。 | 模擬実験解析による手法の妥当性検討必要。 |
| | 層 別 貯 藏 中心空領域なし 中心空領域あり | 実際に貯蔵される燃料 外側炉心燃料 内側炉心燃料 径プランケット燃料 | 燃料組成が種々異なる高速炉燃料に対し、貯蔵領域を限定することにより、実効増倍率の低減をはかる。 | 最適化された配列により、体系を稠密化。 |

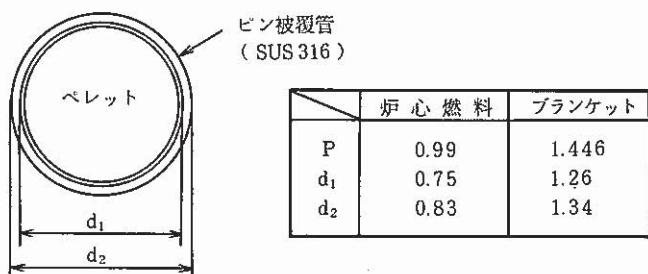
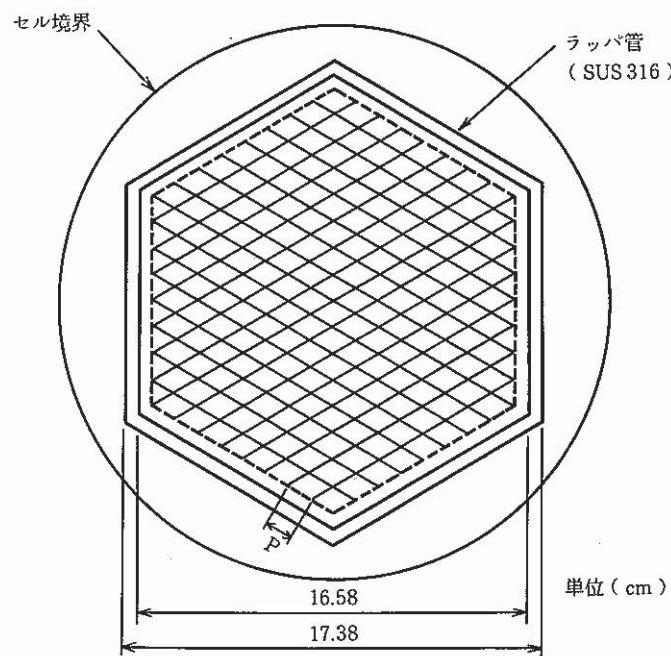


図 3.4-1 集合体セル・モデル(無限配列)

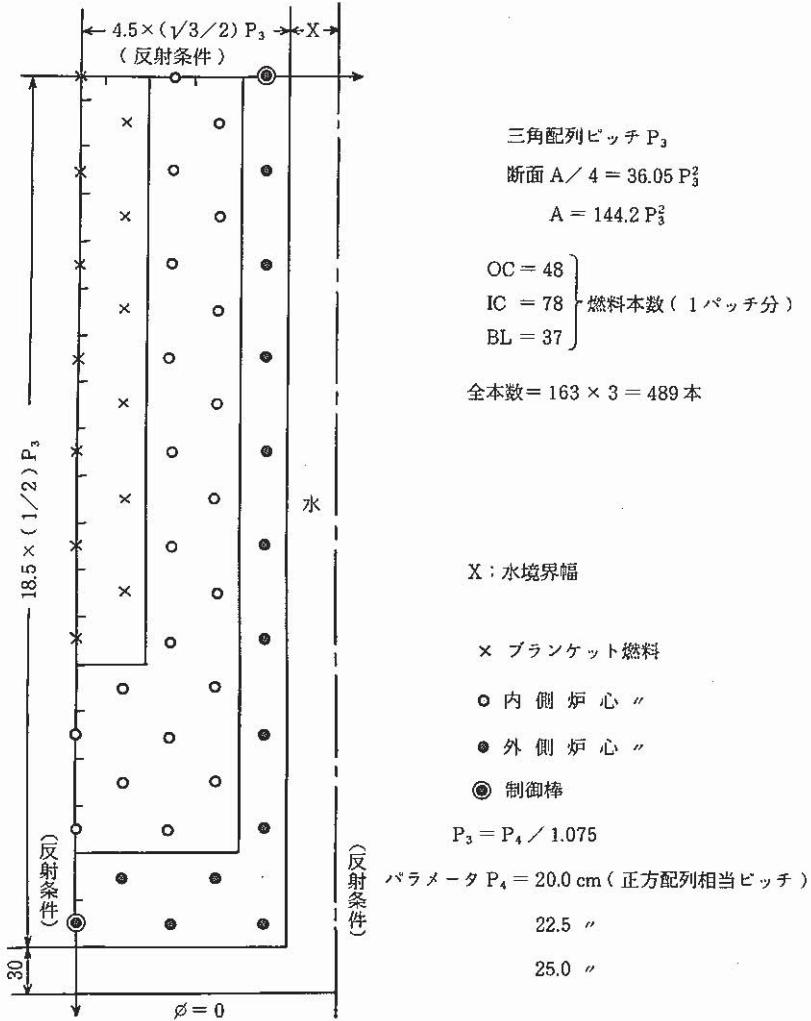


図 3.4.2 S/F 水中貯蔵〔層別装荷〕(ケース 1)
(中心空領域なし)

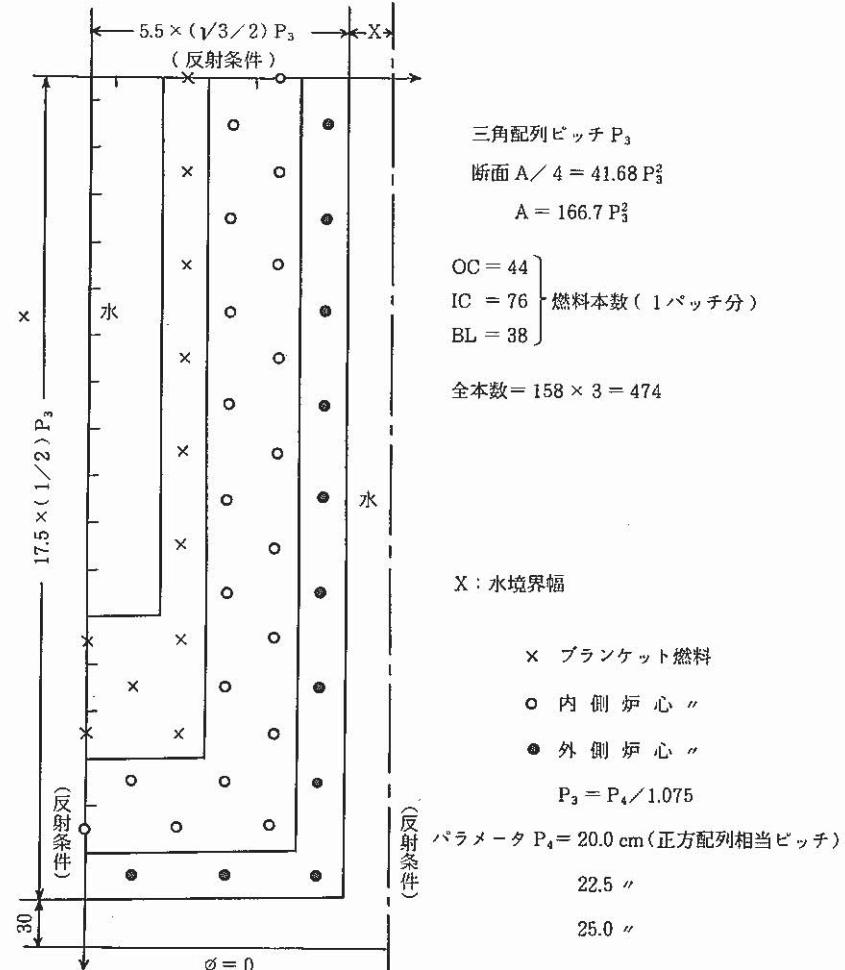


図 3.4.3 S/F 水中貯蔵〔層別装荷〕(ケース 2)
(中心空領域あり)

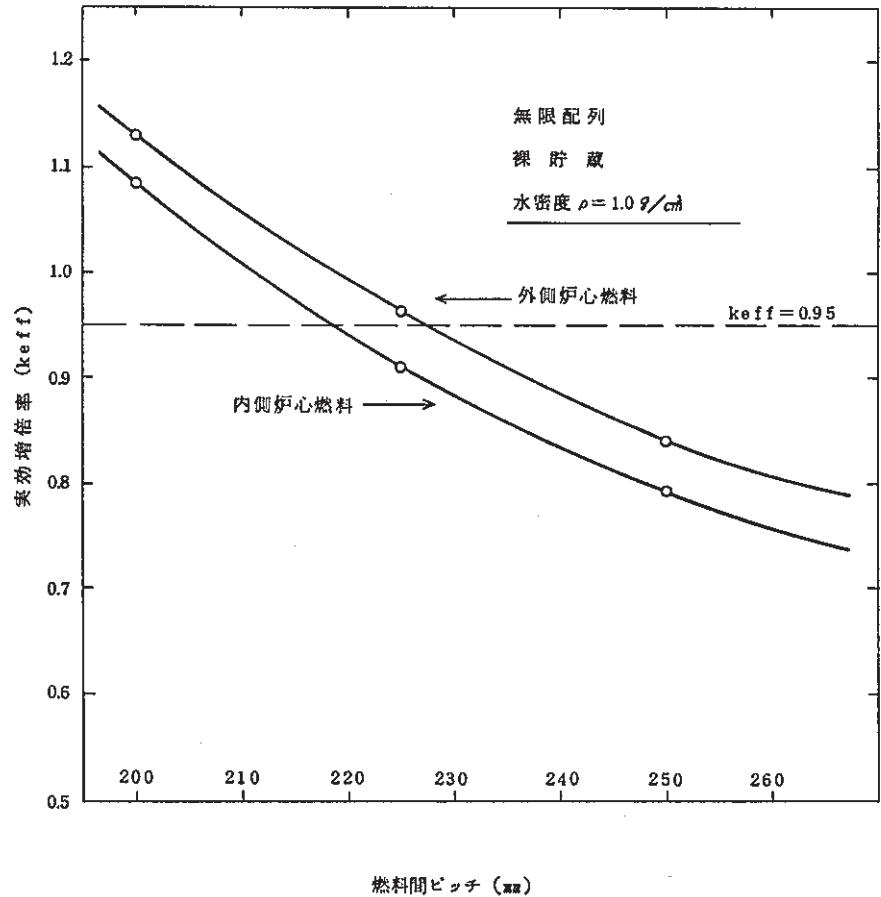


図 3.4-4 燃料間ピッチと実効増倍率の関係
(無限配列)

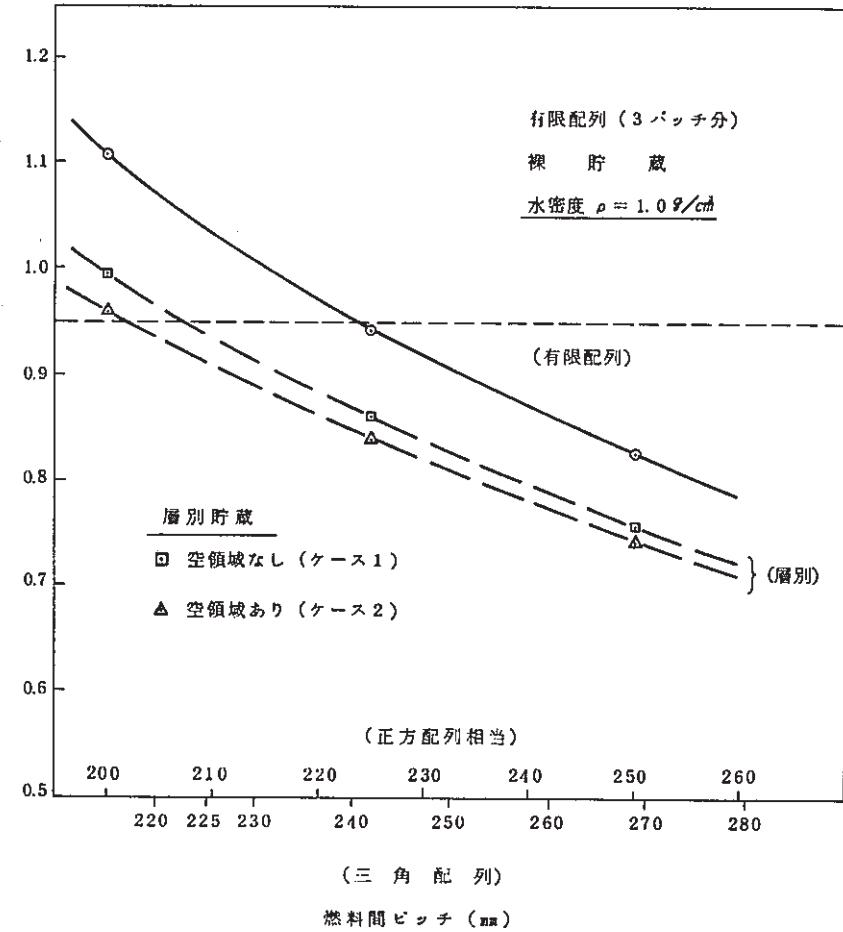


図 3.4-5 有限配列及び層別貯蔵の効果

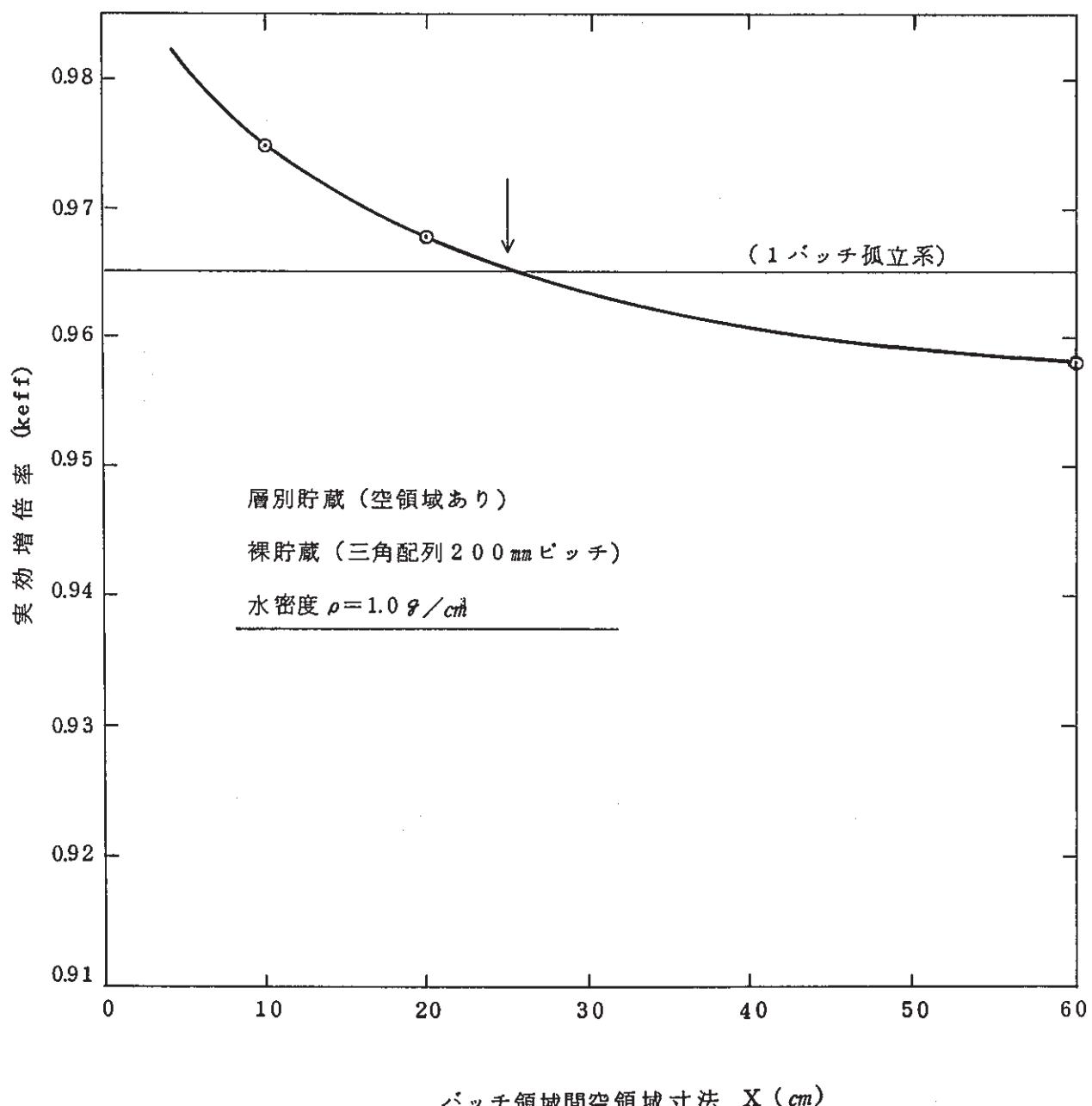


図 3.4-6 パッチ領域間距離と実効増倍率の関係

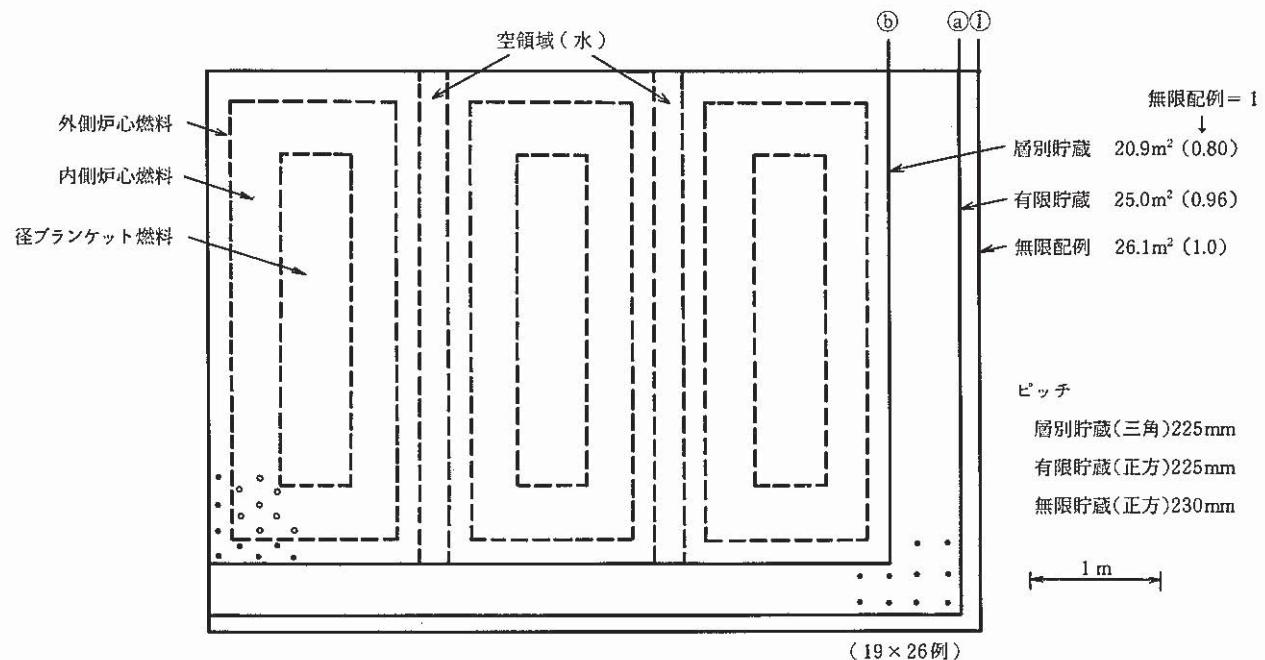


図 3.4-7 層別貯蔵(中心空領域なし)の稠密性の評価

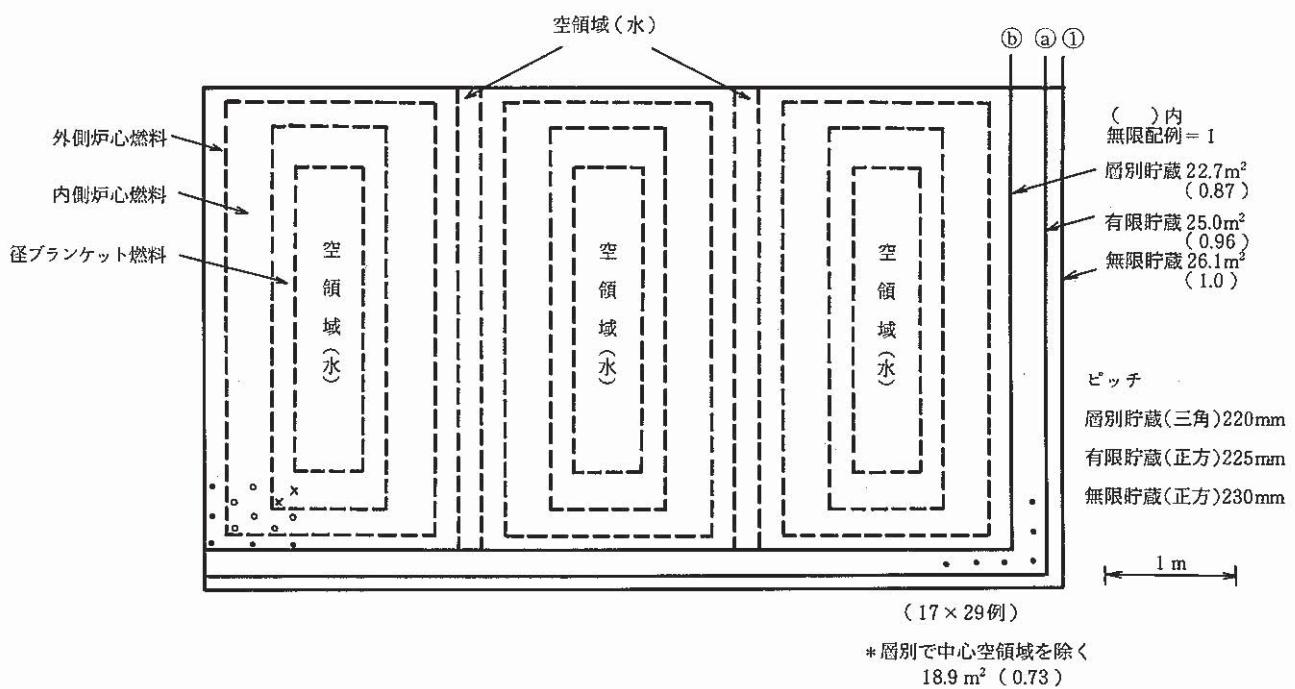


図 3.4-8 層別貯蔵(中心空領域付)の稠密性の評価

3.5 破損燃料取扱に係る検討

燃料取扱設備の合理化にとって破損燃料専用の設備を極力少なくすることが望ましい。例えば、破損燃料を通常燃料と同様、水プールから搬出することにより専用設備は不要となる。破損燃料の水プールからの搬出については、洗浄に伴うインパクト及び水プール内での破損燃料からの燃料物質の移行等不確定要因があり、現状ではこれにふみ切れない。

一方、現設計では付着Naの除去を高温アルゴンガス洗浄で行うため従来の湿式洗浄に比べて破損燃料の洗浄は受け入れやすいと考えられ、水プール持ち込み前に缶詰することにより破損燃料から水プールへの燃料物質の移行は防止することができるものと考えられる。このような観点から、破損燃料を高温アルゴンガス洗浄後水缶詰し、水プールから搬出するものとして各種検討を行い課題を明らかにした。

3.5.1 破損燃料缶詰設備の概念

破損燃料の取扱いに係る設備を可能な限り簡素化する観点から設備概念の検討を行った。

(1) 缶詰手順の検討

① 缶詰場所の選定

次の点からプール中継槽を缶詰場所として兼用することにする。

- ・プールへ吊りおろす燃料を中継、保持するための装置が設けられているため、これを缶詰缶の保持に兼用することにより缶詰装置の簡素化が可能となる。
- ・給水失敗等を想定しても水分、湿分の処理が可能である。

② 空缶詰缶の搬入方法

可能な経路としては次のイ～ロが考えられる。

- イ. 新燃料容器用地下台車で不活性ガスセル下面に接続し、不活性ガスセル内移送機で吊り上げ、セル内の缶詰用ポジションに移送する。この方法では、地下台車に搭載する空缶詰缶専用の収納容器と不活性ガスセル内移送クレーンの燃料案内用スリーブの大径化が必要となる。
- ロ. 不活性ガスセルの天井にポートを設け、専用の取扱機によって搬入する方法であるが、この方法では専用の取扱機が必要となる。
- ハ. 水プールエリアから水中台車でプール中継槽に押し上げる方法では、専用の取扱機及び治具を必要としないが、缶を開放状態で持込む場合は缶内の水位を調整するための設備がなければ、缶詰の密封後缶内水の膨張により缶を破損する可能性がある。また缶を密封の状態で持込むためには、ガスケット材をゴム系のものとするか開封後のガスケットの交換が必要であり、後者の場合は複雑な設備が、前者の場合はガスケットの耐放射線性及び耐水性が問題になる。更に缶内に破損燃料を搬入する際に大量の空気を発生し、これが不活性ガスセル内に持込まれる可能性がある。

以上を考慮すると、ハは技術的な困難さが大きく、かつ補助的な設備の規模も大きくなる可能性があり、あまり魅力がない。イ、ロの比較では、イは缶詰缶用の収納容器を地下台車に積み換えるのみであり、ロよりも物量的にはやや分があるが、不満性ガスセルクレーンのスリーブを大口径化することは移送中の燃料の支持、昇降途中の使用済燃料の冷却を考えると得策とは考えられない。これは昇降途中の燃料集合体内に十分な冷却ガスを供給するためにはグリッパと案内筒の隙間を十分小さくする必要があり、グリッパが必然的に大口径化するためである。

またロによる場合の取扱機は新燃料及びセル内のナトリウムに対する軽い遮蔽とセル気密性を保持するバグを組合せた簡単なもので十分と予想される。従って、缶の搬入方法としては、ロ案を採用する。以上から缶詰操作の手順は次の通りとなる。

- ① プール中継槽直上の不活性ガスセル天井に設けたポートに、空缶詰缶の取扱機を接続
- ② セル天井ポート、プール中継槽ポートを開
- ③ 空の缶詰缶を吊りおろす
- ④ 缶詰缶をプール中継槽のクランプ機構で保持
- ⑤ 空缶詰缶取扱機グリッパ上昇
- ⑥ セル天井ポート閉
- ⑦ 取扱機取外し
- ⑧ 缶詰装置を同ポート上に接続
- ⑨ セル天井ポート開
- ⑩ 缶詰装置下降、缶フタ取外し、上昇
- ⑪ 燃料を不活性ガスセル内クレーンで缶詰缶内に挿入
- ⑫ 缶詰装置下降、缶フタ閉、上昇
- ⑬ 缶内注水
- ⑭ 缶を水プールへ移送
- ⑯ 缶詰装置を取り外し

(2) 設備概念の検討

① 缶詰缶の概念

缶詰缶に要求される密封性としては、破損燃料用キャスクの輸送基準を考慮し、 10^{-3} atm・cc/sec程度と仮定すると、これを実現するためには機械式のガスケット(メタル、ゴムOリング等)で十分可能である。ガスケット材質は、耐放射線性及び耐水性を考慮し当面メタルOリングの採用も可能性がある。

ガスケットの締付方法としては、フランジボルト締め、ネジ込み蓋が考えられるが締め込み操作の容易性を考慮してネジ込み蓋方式をとる。缶内への注水方法はフタ締め込み後

缶胴部にプール中継槽からコネクタを接続して排気および給水を行う。

缶詰缶の内径は集合体外接円径約 200.7 mm, および原型炉で想定されている程度の曲がり量を想定しても収納可能な径として 220 mm とした。また内高は集合体全長 4,300 mm + 原型炉で想定されている程度の伸び(40mm)に余裕を持って 4,500 mm とした。

以上によって設定した缶詰缶の構造概念を図 3.5 - 1 に示す。

② 缶詰装置の概念

缶詰装置の概念を図 3.5 - 2 に示す。破損燃料缶詰缶は、缶詰装置全体をプール中継槽直上の不活性ガスセル天井に設けたポートに仮設する。缶詰装置本体は、テレスコピックに伸縮可能かつ缶フタと連動して回転可能なグリッパで構成する。

(3) 破損燃料取扱上の課題について

破損燃料取扱上の課題について明らかにするために、次の条件を前提としたときの取扱条件をまとめ表 3.5 - 1 ~ 表 3.5 - 3 に示した。

- ・取出時期および発熱条件：通常取扱の設備を兼用することにし同一条件とする。
- ・発生条件：炉心燃料の 0.01% が破損すると想定する。
- ・貯蔵条件：水缶詰でプール内貯蔵。
- ・搬出条件：水缶詰した燃料をキャスクで搬出する。
- ・取扱条件：洗浄後水プールに持込み缶詰する。

表 3.5 - 1 破損燃料の洗浄に関する条件

| 項 目 | 内 容 |
|---------------------|--|
| 洗 浄 の 可 能 性 | <p>① 洗浄は乾式洗浄を行うので表面のナトリウムについては洗浄できるが、破損ピン内のナトリウムを洗浄できるかどうかについては R／D の必要がある。また、洗浄中に破損部が拡大する事がないかについても R／D で確認する必要がある。</p> |
| 水中移送時のナトリウム水反応 | <p>① 破損部の近くのピン内ナトリウムは水中ではプラグすると考えられるので、一時的な移送中の反応は少ないと考えられるが、R／D の必要がある。</p> <p>② 水缶詰した場合にピン内の未洗浄ナトリウムが反応し缶内に水素が発生することが考えられるため、これを考慮した設備計画を行う。</p> |
| 下流側の気体廃棄物処理系へのインパクト | <p>① FP のうち希ガスは洗浄設備から気体廃棄物処理系へ廃ガスとして送られる。気体廃棄物処理系を 1 体の破損燃料から放出される希ガスを処理できるように設計する必要がある。</p> <p>「もんじゅ」でも同程度の条件で計画しており設備規模、システム上の問題は特になし。</p> |

表 3.5-2 破損燃料からの FP 放出条件

| 項 目 | 内 容 |
|--------------------|--|
| 破 損 形 態 | <p>① 破損燃料は炉内の FFD で検知されたものを取扱う。また取扱中に新たに破損することは考えられない。</p> <p>② 燃料の形態が維持できないほどの大規模な破損は事故時のみであり、設備計画上は小さなクラック破損を想定する。</p> |
| FP の 放 出 | <p>① 取扱中は燃料の冷却を行い過熱状態とならないよう設計を行うことから、燃料ペレットからの FP の放出は考えられない。</p> <p>② 破損燃料のガスプレナム中の FP ガスのうち、炉内で放出されずピン内に残存した FP が放出される。</p> |
| α 物 質 の 移 行 | <p>① 破損燃料の洗浄・水中取扱時に α 物質が移行するかどうかについては現状では明確ではなく、今後の R/D により条件を設定する必要がある。</p> |

表 3.5 - 3 破損燃料取扱上の課題と設備設計への影響

| 課題 | 課題が解決された場合 | 課題が解決されなかった場合 |
|----------------|---|---|
| 破損ピン内ナトリウムの洗浄 | <p>① 水缶詰が可能となり、通常燃料の取扱ルートと共に化する。</p> <p>② 洗浄設備で1体の燃料を洗浄する場合の除去すべきナトリウムの量が約 26^{*1} g から約7^{*2} kg (全ピン破損の場合)となるため、これに対応した設備を計画する。</p> | <p>① プール内で水缶詰した後、缶内で水素が発生するため、圧力が上昇する。このための対策を行う必要がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> 缶詰缶へのベントライの設置 <p>② 缶内で多量のNaOHが生成されるので、この対策を考える必要がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> 缶内の水のサンプリングが行えるようにしておく。 |
| α 物質の移行 | <p>① 現計画の水缶詰が可能となる。</p> | <p>① 通常燃料のルートとの共用化は不可能となる。</p> <p>② 「もんじゅ」と同様に洗浄せずにHe缶詰しFMFへ移送する。また、He缶詰輸送に伴い、更に1サイクルの減衰待貯蔵が必要となる。</p> |

^{*1} 付着Na量^{*2} 付着Na量+ガスプレナム内Na
($\varnothing 7.5 \times \ell 102 \times 271$ ピン)

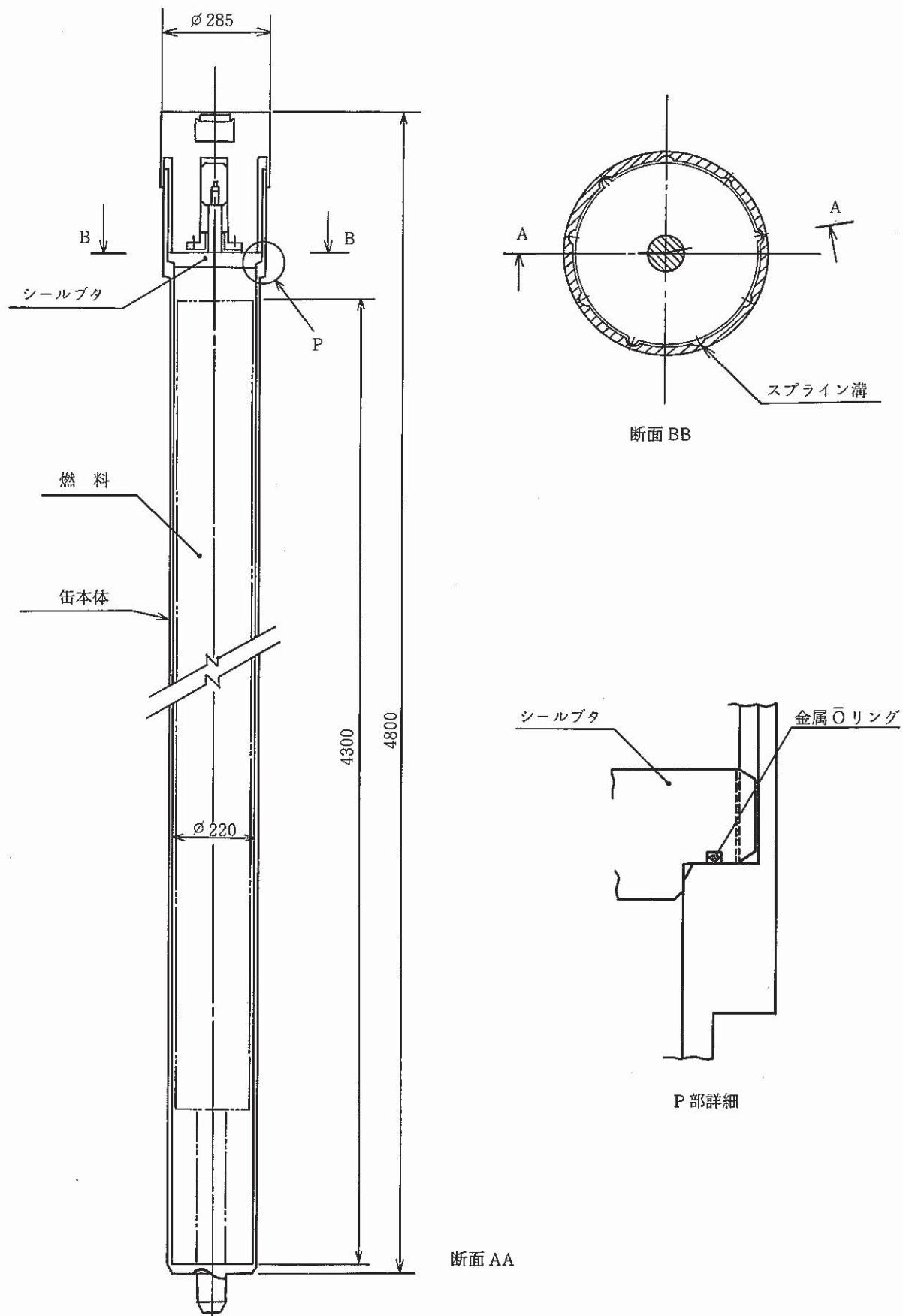


図 3.5-1 缶詰缶概念図

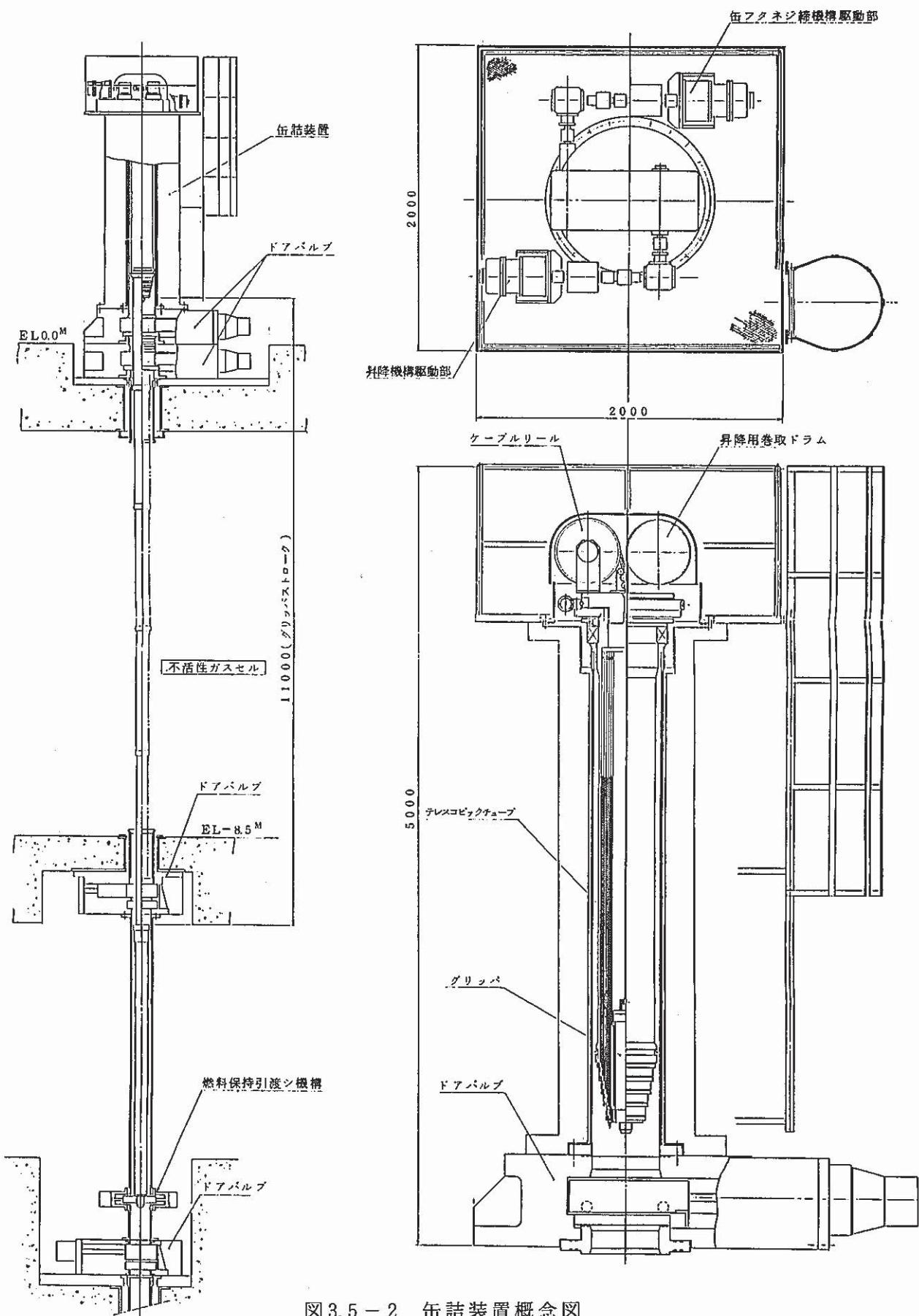


図3.5-2 缶詰装置概念図

3.6 まとめ

使用済燃料を炉内貯蔵+水プール貯蔵する燃料取扱設備について空気セルを削除したシステムの検討を行った。主要な検討事項に関する結論をまとめると以下の通りである。

(1) 空気セル削除システム（含地下台車の廃止）

不活性ガスセルと水プール間の雰囲気隔離対策としてプール中継槽による燃料中継及び湿分除去を行うことで空気セル及び地下台車の廃止ができた。この効果を経済性、安全性及び運転保守性の観点から60年度設計との比較で示すと次のようになる。

① 経済性

物量比較は図3.6-1に示す通りであり、プール中継槽方式の採用による物量低減効果は10%と見込まれる。

② 安全性

安全性の指標として燃料冷却に係る系統数を比較すると表3.6-1に示す通りであり、プール中継槽方式を採用することにより強制冷却系が半減し、安全性は向上する。

③ 運転保守性

運転保守性の指標として汚染動的機器数を比較すると表3.6-2に示す通りであり、プール中継槽方式採用の方がやや有利という結果が得た。

以上より、空気セルの削除（含地下台車の廃止）を図った燃料取扱設備の採用効果が確認された。

(2) 使用済燃料貯蔵ラックの稠密化

従来の評価手法（Pu富化度の高い燃料で無限配列）から、有限配列による評価及び層別貯蔵（最適化された配列で、その配列に対応した燃料組成条件で評価）と稠密化を進めた場合の未臨界性解析を行い、その効果を明らかにした。

(3) 破損燃料の取扱い

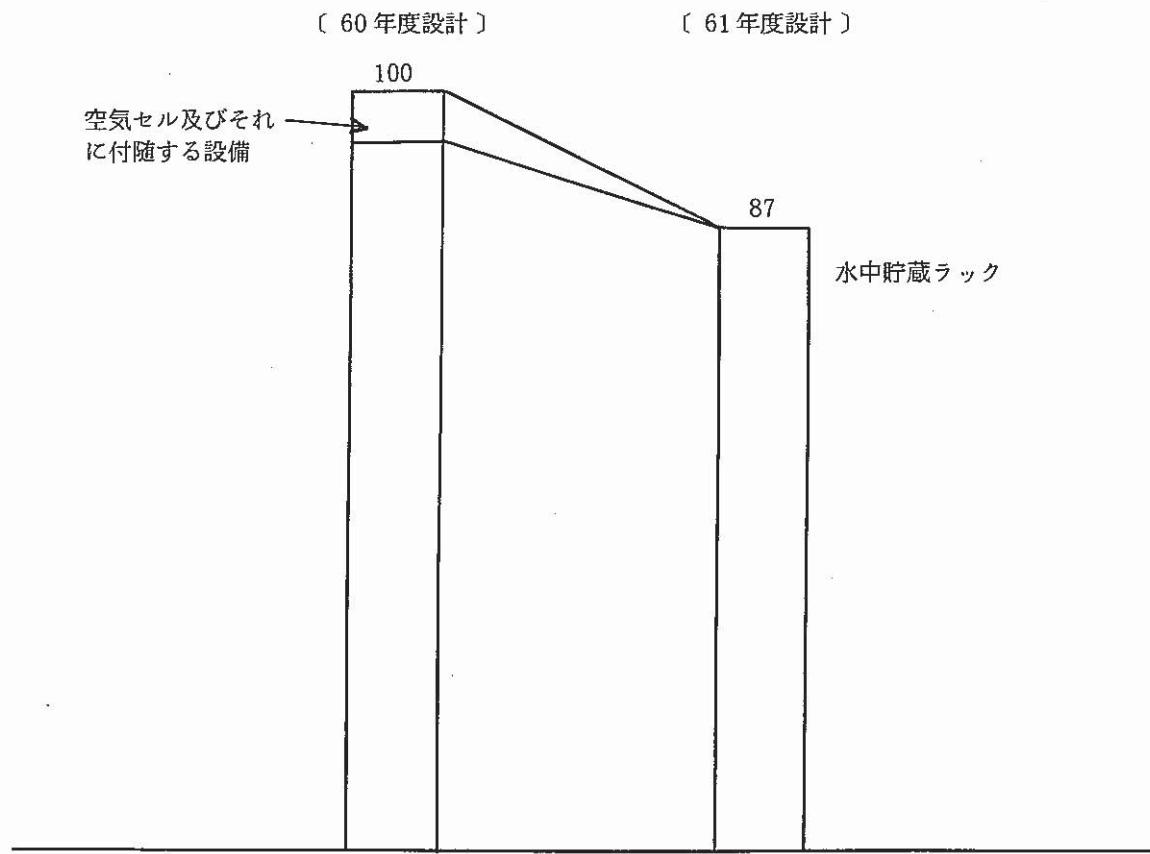
Na除去を高温アルゴンガス洗浄で行うため破損燃料の洗浄は湿式洗浄に比べ受け入れ易いことから、破損燃料専用設備の削減に着目して水缶詰後に水プールを経由して搬出する方向での設備概念を検討した。設定した概念は次の通りである。

① 破損燃料の缶詰場所としてはプール中継槽を兼用する。

② 缶蓋の開閉はネジ込み式とする。

③ 缶のプール中継槽への持ち込み及び缶蓋脱着のために取扱機を設ける。

以上のような水缶詰方式での設備概念をまとめたが、最終的には水プール内で簡易缶詰するのがもっとも合理的な方法であり、このための課題をまとめた。



注1) 比較のベースを合せるため破損燃料用設備、新熱料予熱装置は算定から除外した。

図3.6-1 物量比較

表3.6-1 燃料冷却に係る系統数の比較

| 60年度設計 | 61年度設計 |
|--------------------|--------|
| 7系統 | 4系統 |
| ① 不活性ガスセル内移送機燃料冷却系 | ① 同 左 |
| ② 不活性ガスセル霧囲気調整系 | ② 同 左 |
| ③ 燃料洗浄設備燃料冷却系 | ③ 同 左 |
| ④ 地下台車燃料冷却系 | _____ |
| ⑤ 空気セル内移送機燃料冷却系 | _____ |
| ⑥ 空気セル霧囲気調整系 | _____ |
| ⑦ プール水冷却净化系 | ④ 同 左 |

表 3.6-2 メンテナンス(機構数)の比較

| 60 年 度 設 計 | 61 年 度 設 計 |
|---|--|
| 30 | 28 |
| 1. 不活性セル内移送機 (走行, 昇降, グリッパ開閉, 冷却) ガス送風 | 1. 不活性ガスセル内移送機 (走行, 横行, 昇降, グリッパ開閉) 冷却ガス送風 |
| 2. 不活性ガスセル霧囲気調整系 (霧囲気ガス循環) | 2. 不活性ガスセル霧囲気調整系 (霧囲気ガス循環) |
| 3. 燃料洗浄設備 (加熱冷却ガス循環) | 3. 燃料洗浄設備 (加熱冷却ガス送風) |
| 4. 地下台車 (走行, 冷却ガス送風) | 4. 不活性ガスセルまわりドアバルブ 3×② (洗浄槽, 新燃料取出, プール中継) 槽 |
| 5. 空気セル内移送機 (走行, 横行, グリッパ開閉, 昇降) 冷却ガス送風 | 5. プール中継槽 (燃料支持, 下部ドアバルブ) |
| 6. 空気セル霧囲気調整系 (霧囲気ガス循環) | 6. 水中台車 (走行, 昇降) |
| 7. 不活性ガスセルまわりドアバルブ 2×② (洗浄槽, 地下台車) | 7. プール移送機 (走行, 横行, 昇降, グリッパ開閉) |
| 8. 新燃料貯蔵ラック (回転) | 8. プール水冷却浄化系 (プール水循環) |
| 9. 水中台車 (走行) | 9. プール中継槽霧囲気調整系 (ガス循環) |
| 10. プール移送機 (走行, 横行, 昇降, グリッパ開閉) | |
| 11. プール水冷却浄化系 (プール水循環) | |

備考 1. 本表は、概略比較を目的として汚染動的機構数を1つの機能=機構数1と数えたものである。
 2. 不活性ガスセル内設置機構については2倍(②)の重み付けをした。

4. EVS方式による燃料取扱系の検討

4.1 主要検討条件

EVS方式による燃料取扱系の検討は、2章に示した検討条件に加えて、下記の条件に基き実施する。

- (1) IVSによる使用済燃料の崩壊熱除去は行わず、使用済燃料は直接炉外へ取り出す。
- (2) 原子炉停止後の内側炉心燃料、外側炉心燃料及びブランケット燃料の崩壊熱は図4.1-1～図4.1-3による。ただし、設計には1.2の安全ファクターを乗じたものを用いる。
- (3) 使用済燃料はナトリウム入りの移送ポットに入れて取扱う。
- (4) 使用済燃料の移送はナトリウムポット入り・セル内移送方式とする。
- (5) 使用済燃料の洗浄は実施しない。
- (6) 使用済燃料の搬出待ち貯蔵はガス缶詰貯蔵とする。

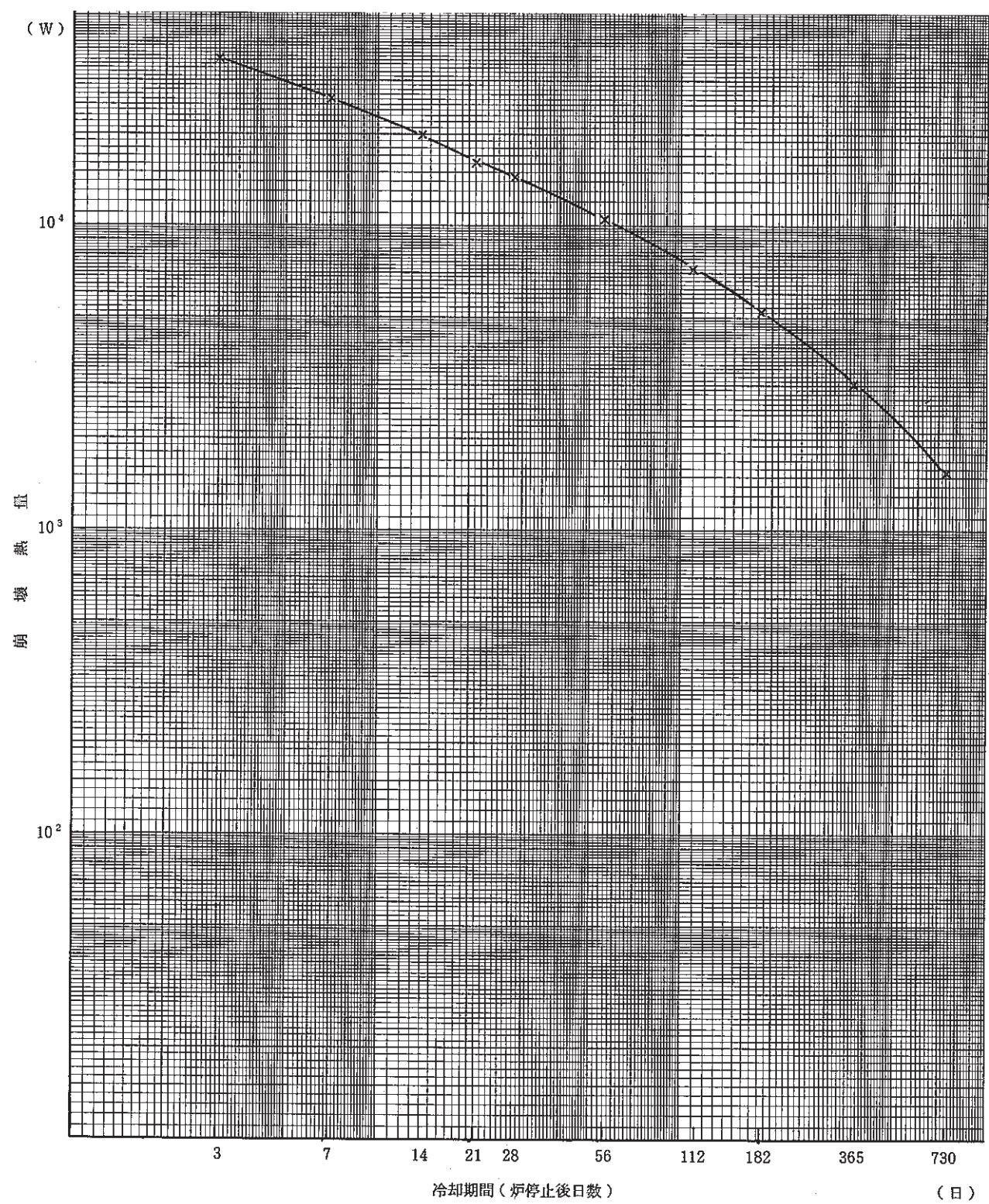


図 4.1-1 炉心燃料の崩壊熱量 (内側炉心)

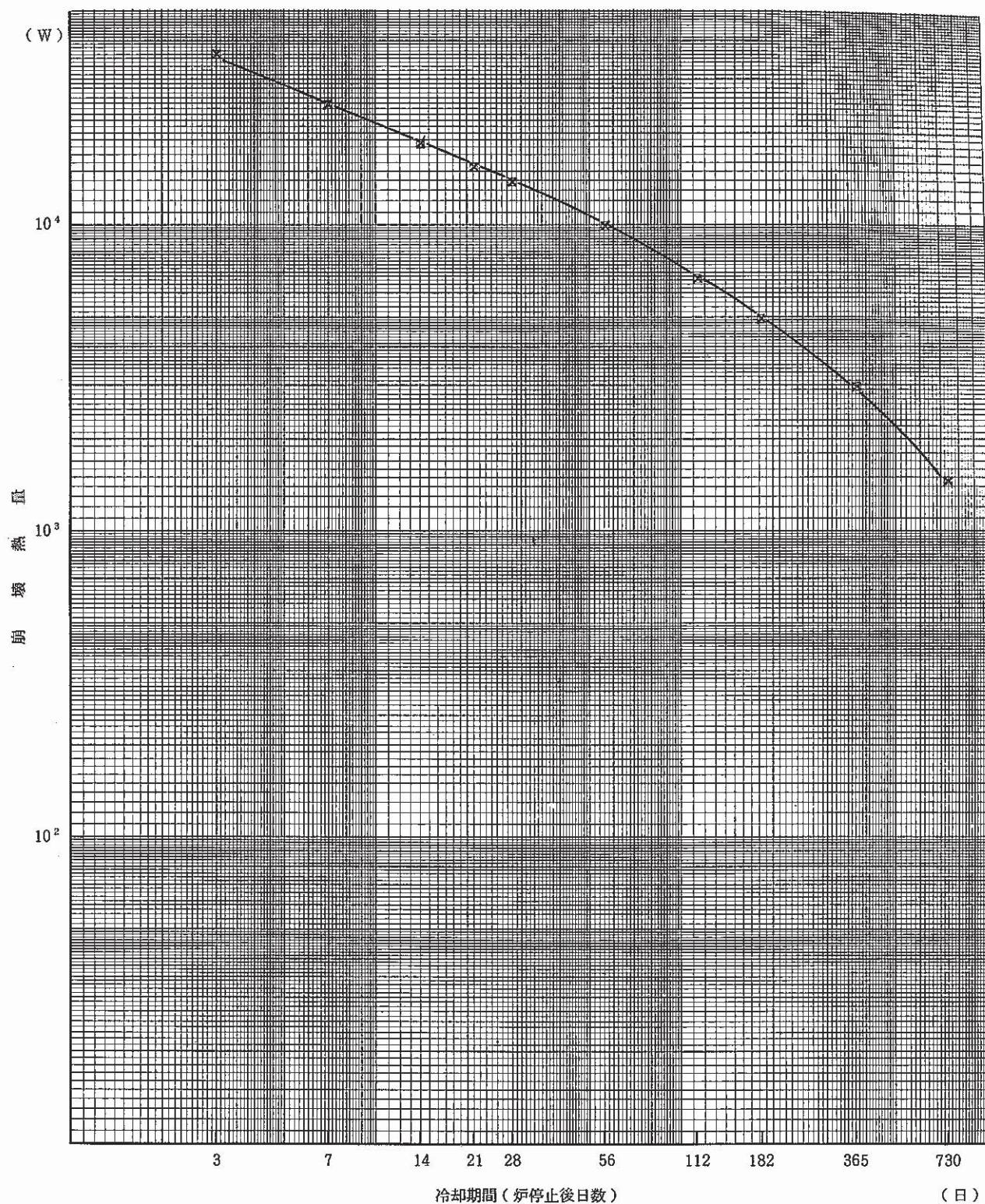


図 4.1-2 炉心燃料の崩壊熱量(外側炉心)

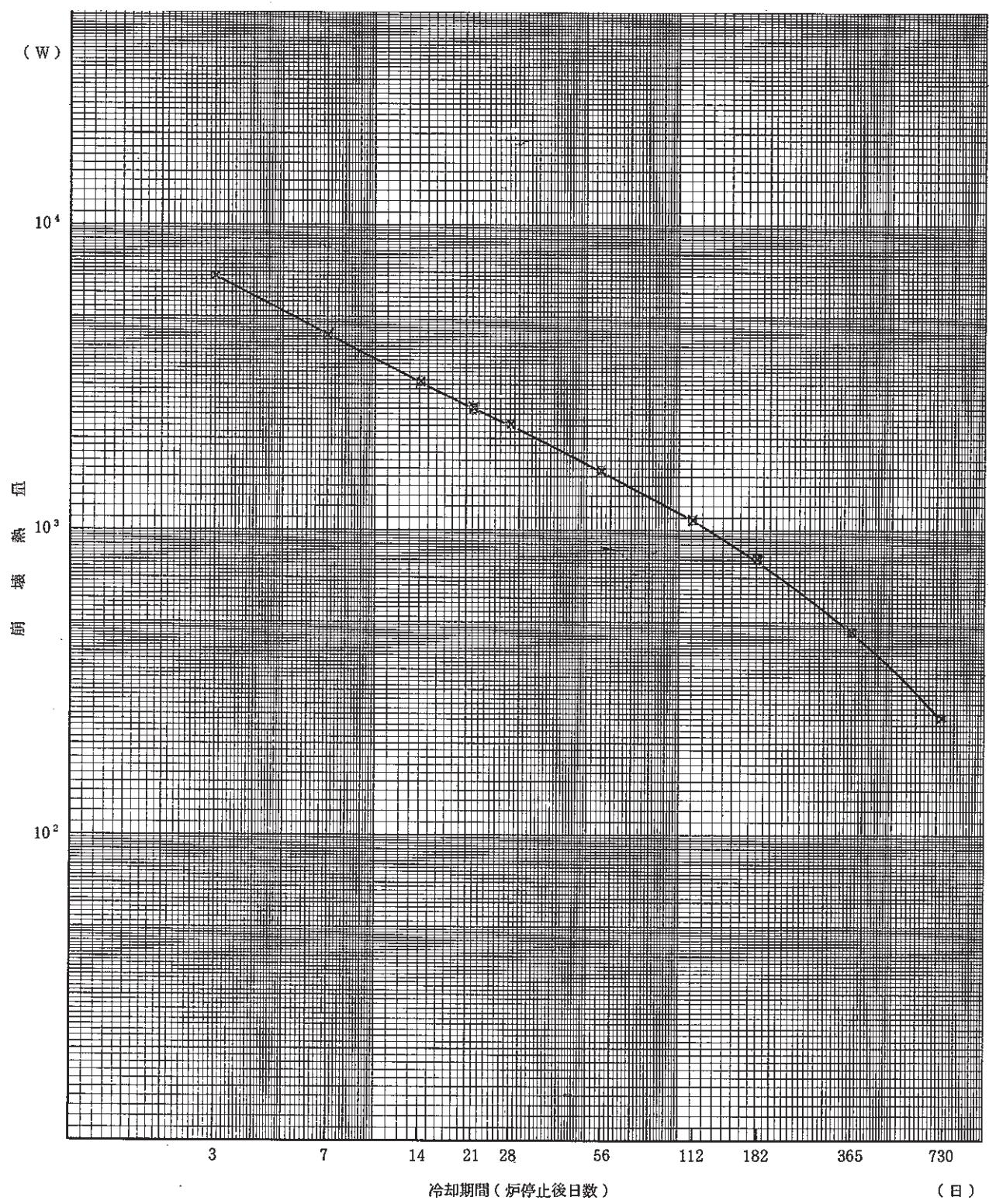


図 4.1-3 ブランケット燃料の崩壊熱量

4.2 EVSの概念

EVSTによらない崩壊熱減衰待ち炉外貯蔵設備（EVS）として、

- ① ナトリウムキャスク EVS方式
- ② ナトリウムポット EVS方式

を検討対象とする。

4.2.1 ナトリウムキャスク EVS方式の基本概念

ナトリウムキャスクEVS方式は使用済燃料の崩壊熱減衰待ちを、炉外のナトリウム入りキャスクで行う貯蔵方式である。このキャスクを使用済燃料貯蔵キャスクと呼ぶ。

図4.2-1にナトリウムキャスクEVS方式の基本概念を示す。

原子炉容器よりナトリウム入りの移送ポットに収納されて取出された使用済燃料は、移送ポットごと使用済燃料貯蔵キャスクに貯蔵される。

途中での燃料洗浄、缶詰等の処理は行わない。

使用済燃料を収納したキャスクは密封され、燃料貯蔵建屋へ移送され、ここに貯蔵される。

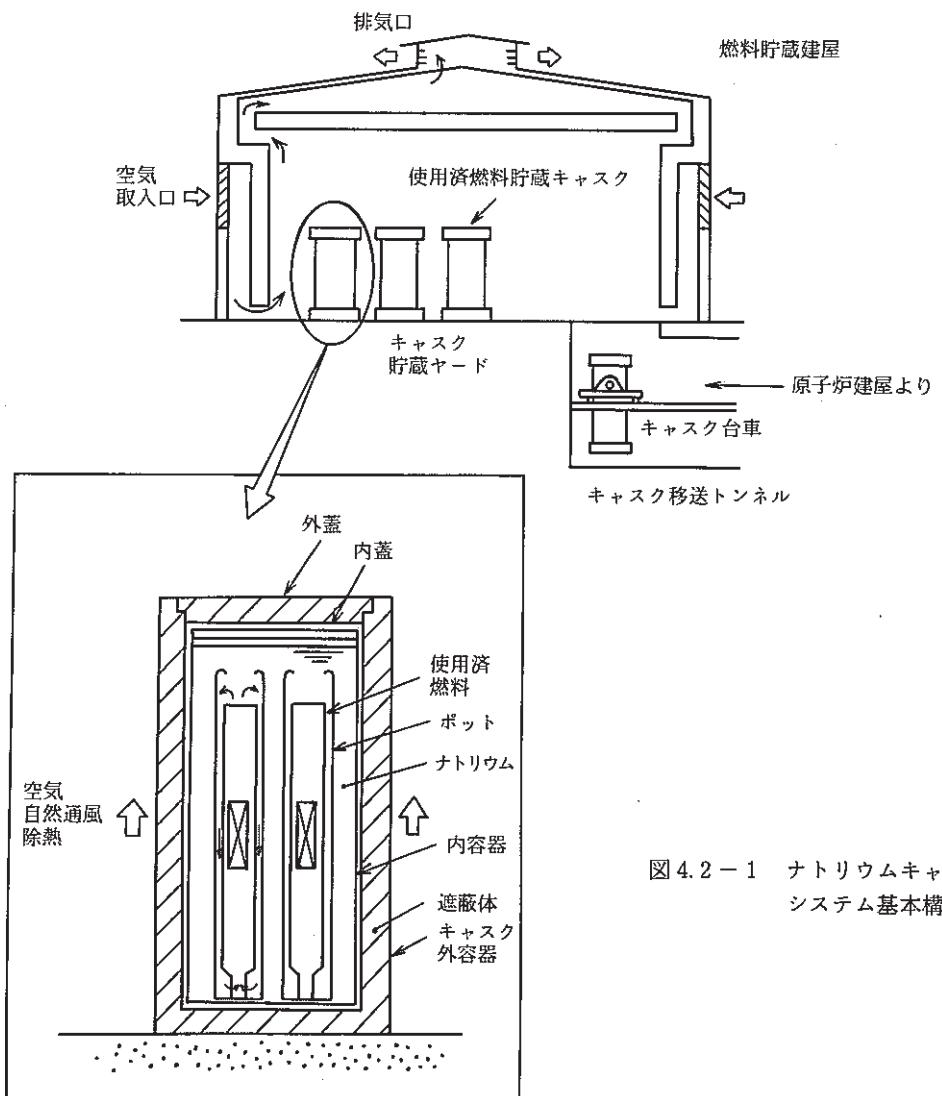
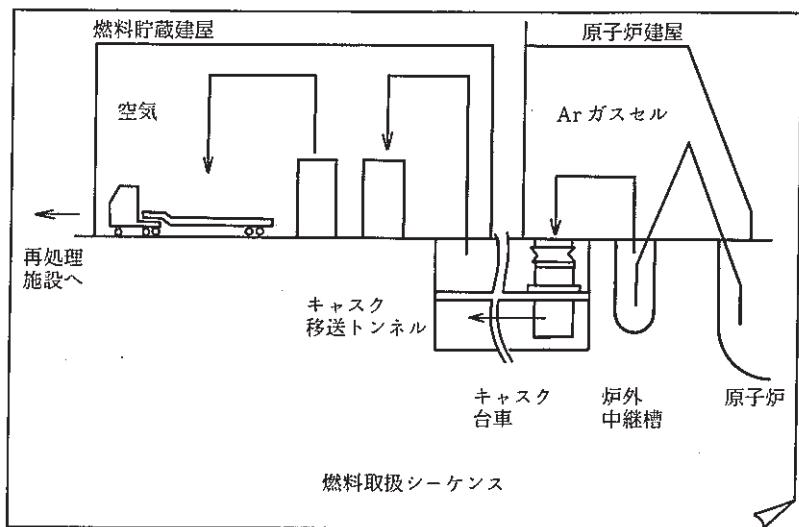


図 4.2-1 ナトリウムキャスク EVS 方式
システム基本構想

図 4.2-1 ナトリウムキャスク EVS 方式
システム基本構想

4.2.2 ナトリウムポット EVS 方式の基本概念

ナトリウムポット EVS 方式は、使用済燃料をナトリウム入りのポットに入れ、崩壊熱の減衰待ち貯蔵を行う方式で、

- ① Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式
- ② 保持筒内ナトリウムポット EVS 方式

の 2 方式が考えられる。

Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式は、使用済燃料入りのポットを Ar ガスセル内の貯蔵ラックに収納し、ポット外面を Ar ガスの自然循環または強制循環によって冷却することにより、使用済燃料の崩壊熱減衰待ちを行う貯蔵方式である。

図 4.2-2 に Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式の基本概念を示す。

保持筒内ナトリウムポット EVS 方式は、使用済燃料入りのポットを Ar ガスセルより吊り下げられた保持筒に収納し、保持筒外面を空気の自然通風または強制通風で冷却することにより、使用済燃料の崩壊熱減衰待ちを行う貯蔵方式である。

図 4.2-3 に保持筒内ナトリウムポット EVS 方式の基本概念を示す。

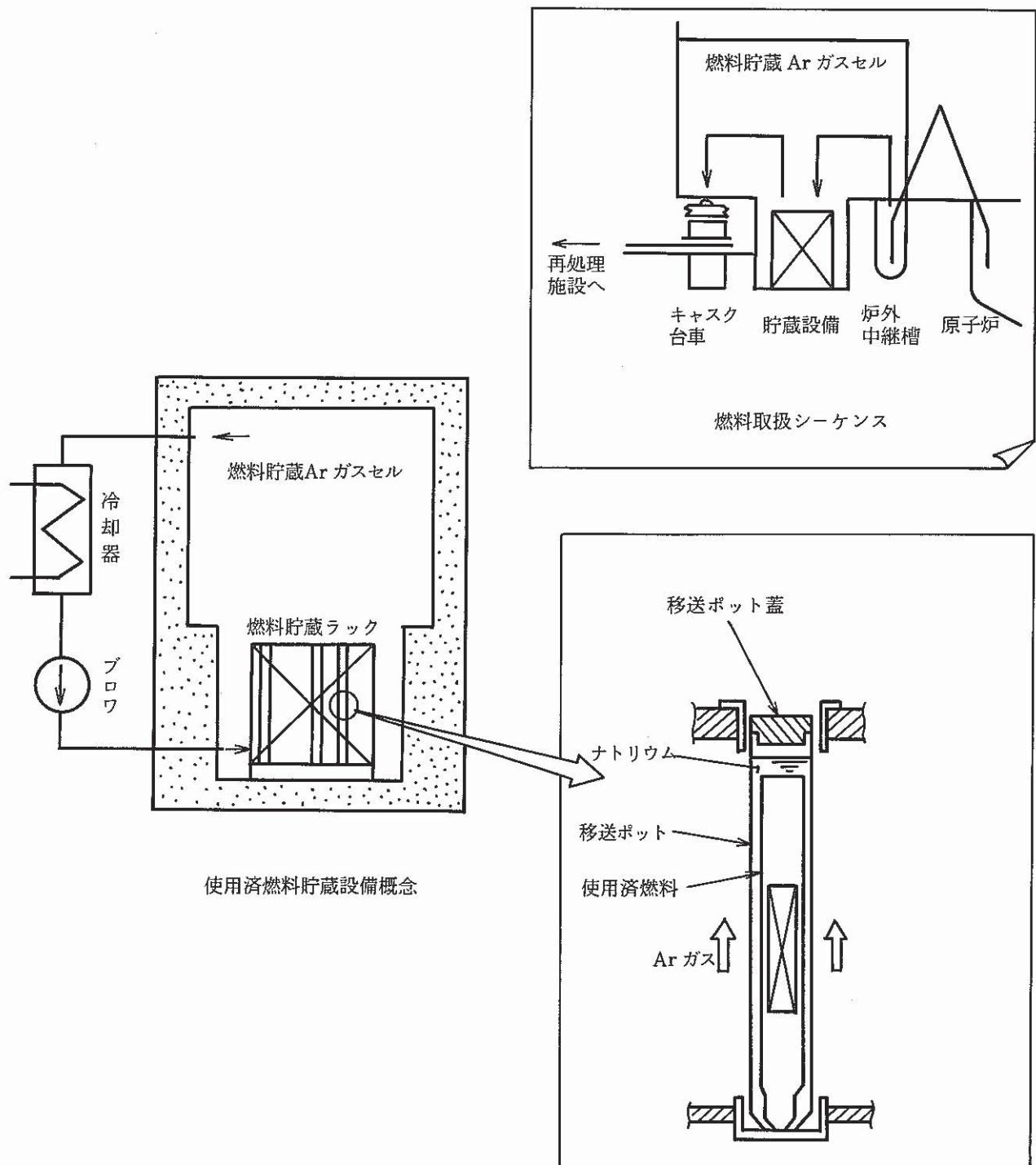
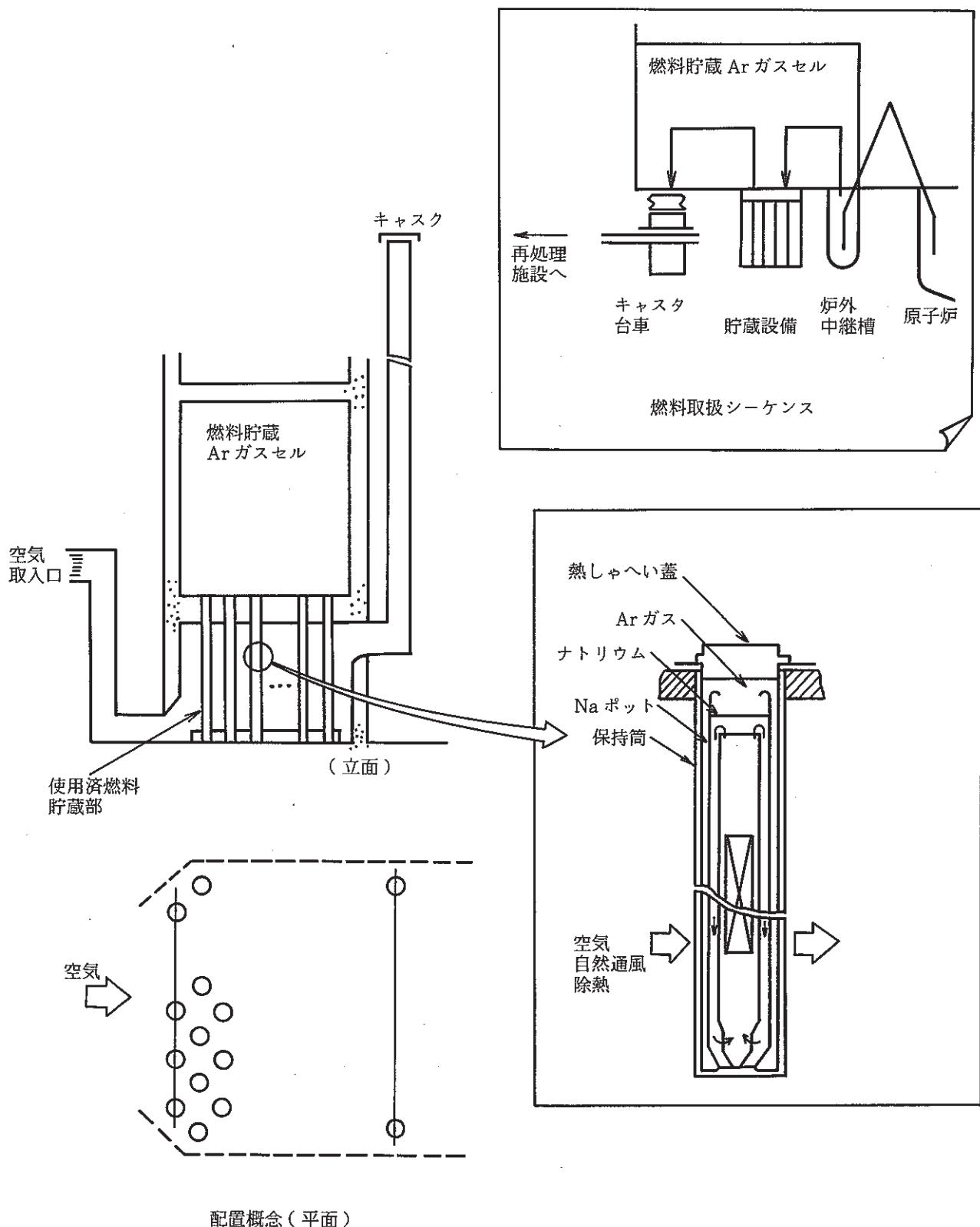


図 4.2-2 Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式基本概念



配置概念 (平面)

図 4.2-3 保持筒内ナトリウムポット EVS 方式基本概念

4.3 ナトリウムキャスク EVS 方式の成立性評価

ナトリウムキャスク EVS 方式による燃料取扱系の成立性を評価するため、使用済燃料貯蔵キャスクの

- ① 未臨界性評価
- ② 遮蔽体構成検討
- ③ 除熱性評価

を行った。

4.3.1 使用済燃料貯蔵キャスクの基本体系

ナトリウムキャスク EVS 方式による燃料取扱系の成立性を評価するにあたって、以下の方針に従い、使用済燃料貯蔵キャスクの基本体系を定めた。

- ① キャスクには高崩壊熱使用済燃料が収納されるので、ナトリウム入りキャスクとする。
- ② 使用済燃料は移送ポットごとキャスク内のナトリウム中に貯蔵する。
- ③ 容器を2重にし、万一キャスクが破損してもキャスク外へのナトリウム漏洩が防止出来る構造とする。
- ④ 使用済燃料貯蔵キャスクは、再処理施設への移送キャスクを兼ねるものとする。キャスクの移送は、燃料貯蔵建屋で2年以上貯蔵されてから行われるものとする。また、移送時のキャスクの放射線量率は、放射性物質取扱装置に対する基準（表面線量率 200 mrem/hr 以下、表面から1m離れた位置の線量率 10 mrem/hr 以下）を満す遮蔽構造を有するものとする。ただし、使用済燃料をキャスクに収納してから再処理施設へ移送するまでの期間は、キャスクの取扱を原則として遠隔で行うものとし、上記の基準は適用しない。
- ⑤ キャスクの重量は輸送上の制限を考慮し 100 ton を目安とする。

使用済燃料貯蔵キャスクの基本体系を図 4.3-1 に示す。キャスクは使用済燃料が入った移送ポットを収納するナトリウムで満たされた内容器と、遮蔽体を形成する外容器とからなり、それぞれに蓋が設けられるものとする。内容器は直接ナトリウムと接するため、ステンレス鋼製とする。外容器は3重構造で内側と外側は炭素鋼、中間は中性子遮蔽体である。熱放射を促進するため、外容器外面にはフィンを取付けるものとする。

なお、移送ポットの概念図を図 4.3-2 に示す。

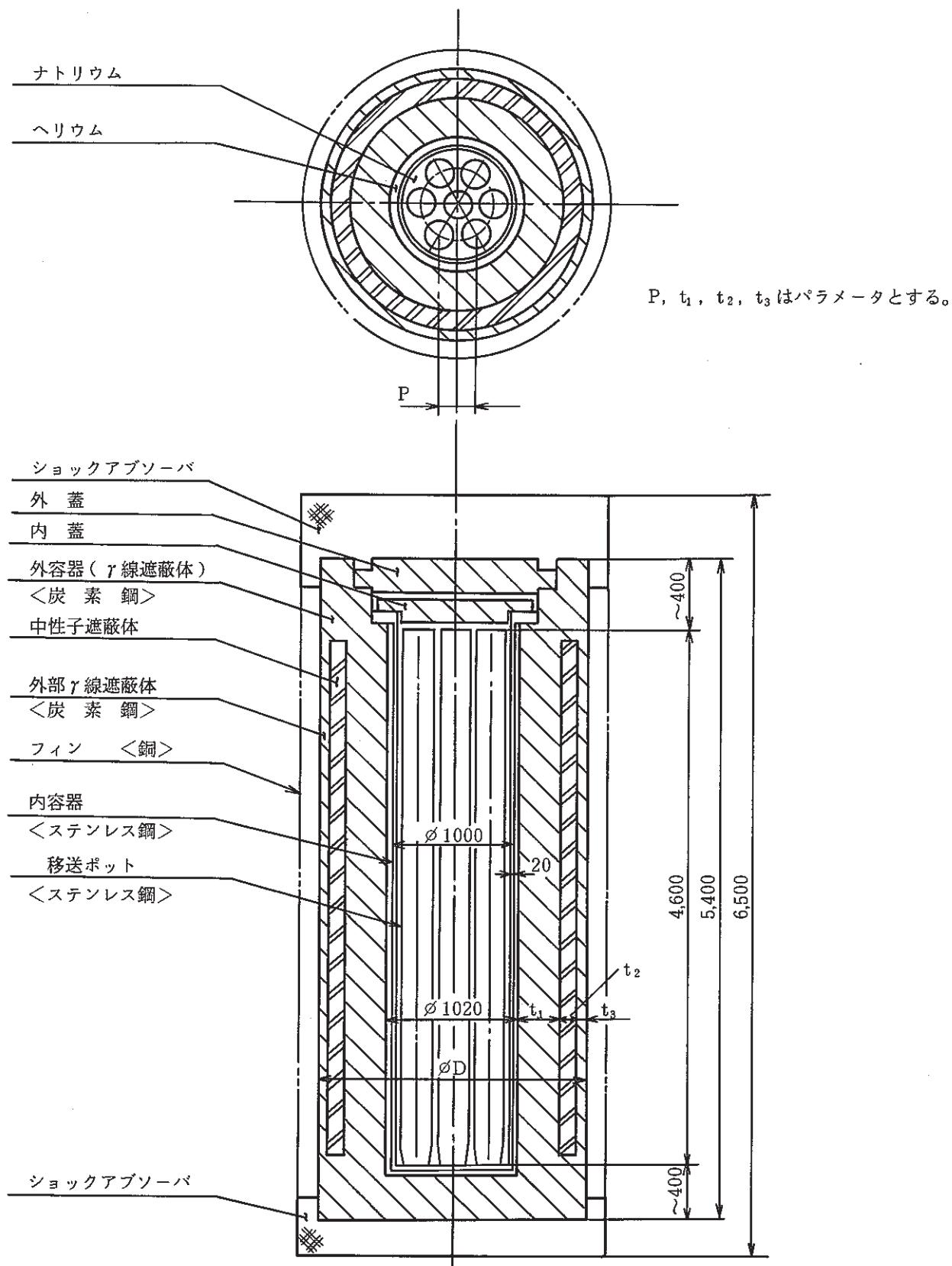


図4.3-1 ナトリウムキャスク基本構成

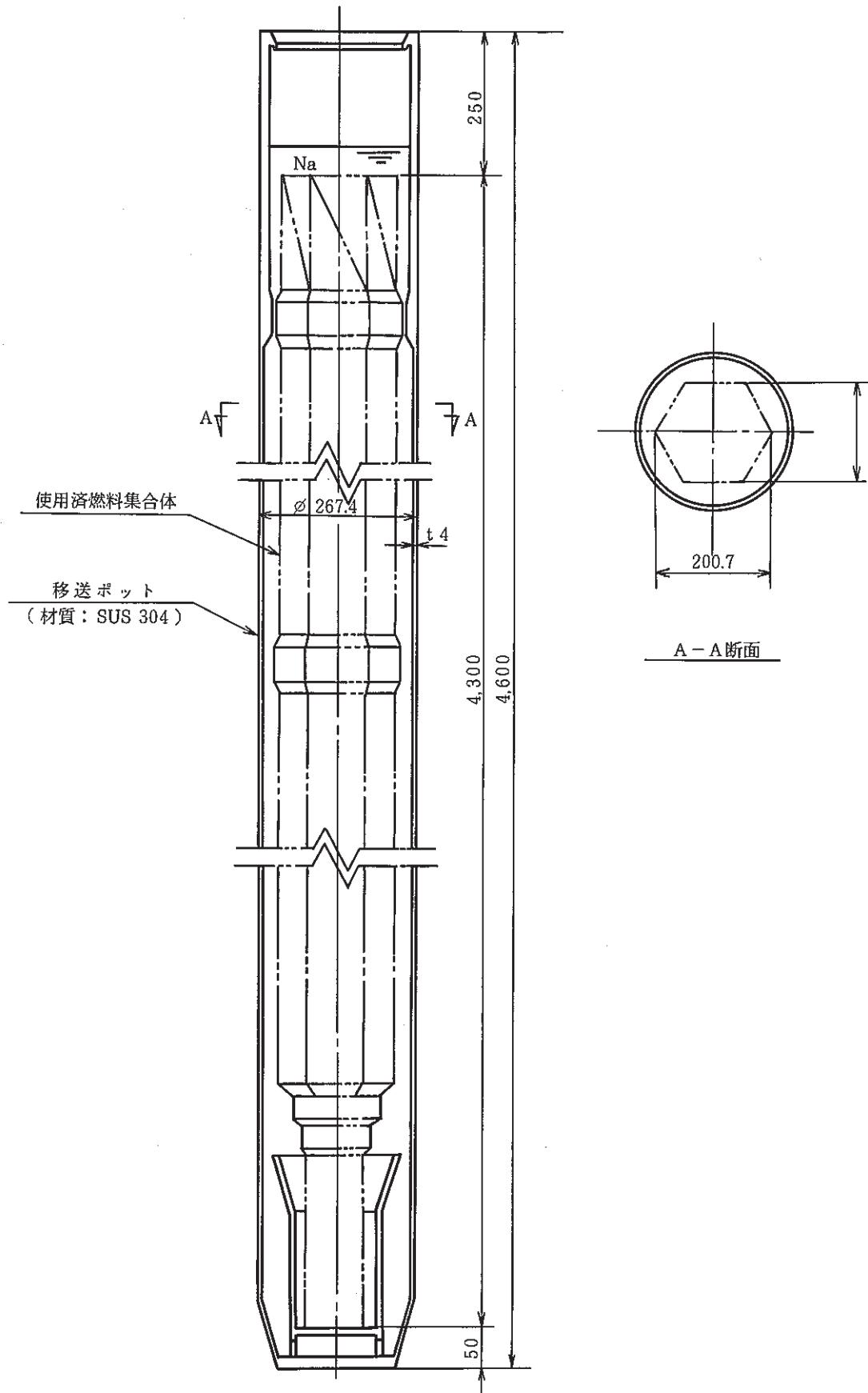


図 4.3-2 移送ポート概念図

4.3.2 使用済燃料貯蔵キャスクの未臨界性評価

使用済燃料を貯蔵したキャスクを燃料貯蔵建屋内に配列貯蔵する場合の未臨界性を評価する。

(1) 評価方法

使用済燃料貯蔵キャスクを無限個隙間なく配列するものとして、キャスク内における移送ポット配列ピッチ、キャスク遮蔽材及びその厚さに対する実効増倍率を計算する。

(2) 評価条件

(i) 設備条件

(a) 燃料集合体

Pu富化度 21.2 w/o の燃料を想定する。この時の原子数密度を表 4.3 - 1 に示す。

体系の温度は保守的評価を行うため 100 °C に設定する。

(b) 移送ポット

外径 26.74 cm 円筒状、肉厚 0.4 cm で、内部はナトリウムで満たされているものとする。

材質は STPA 24 とする。

(c) 使用済燃料貯蔵キャスク

移送ポットを 7 体収納するものとする。図 4.3 - 3 に検討モデルを示す。キャスク遮蔽体の内半径は移送ポット配列ピッチの 1.5 倍とし、空隙部はナトリウムで満たすものとした。

表 4.3 - 1 原子数密度

(barn⁻¹)

| 領域 | 燃料ペレット | 被覆管, ラッパ管* | ナトリウム | 鉛** |
|-------------------|-----------------------|------------------|------------|------------|
| 物質 | (Pu, U)O ₂ | 20% CW SUS316 相当 | | |
| 密度 | TD. 11.01 g/cc | 8.03 g/cc | 0.9269 | 11.34 |
| 備考 | 87.6 % TD ボイド含む | | 100 °C | |
| O | 4.2600 - 2 | | | |
| Cr | | 1.5345 - 2 | | |
| Mn | | 1.5844 - 3 | | |
| Fe | | 5.6629 - 2 | | |
| Ni | | 1.1368 - 2 | | |
| Mo | | 1.2601 - 3 | | |
| ²³⁵ U | 5.1577 - 5 | | | |
| ²³⁸ U | 1.6924 - 2 | | | |
| ²³⁹ Pu | 2.6399 - 3 | | | |
| ²⁴⁰ Pu | 1.0878 - 3 | | | |
| ²⁴¹ Pu | 6.3191 - 4 | | | |
| ²⁴² Pu | 1.7980 - 4 | | | |
| Na | | | 2.4279 - 2 | |
| Pb | | | | 3.2959 - 2 |

* 移送ポットについても適用

** 遮蔽材のサーベイ時適用

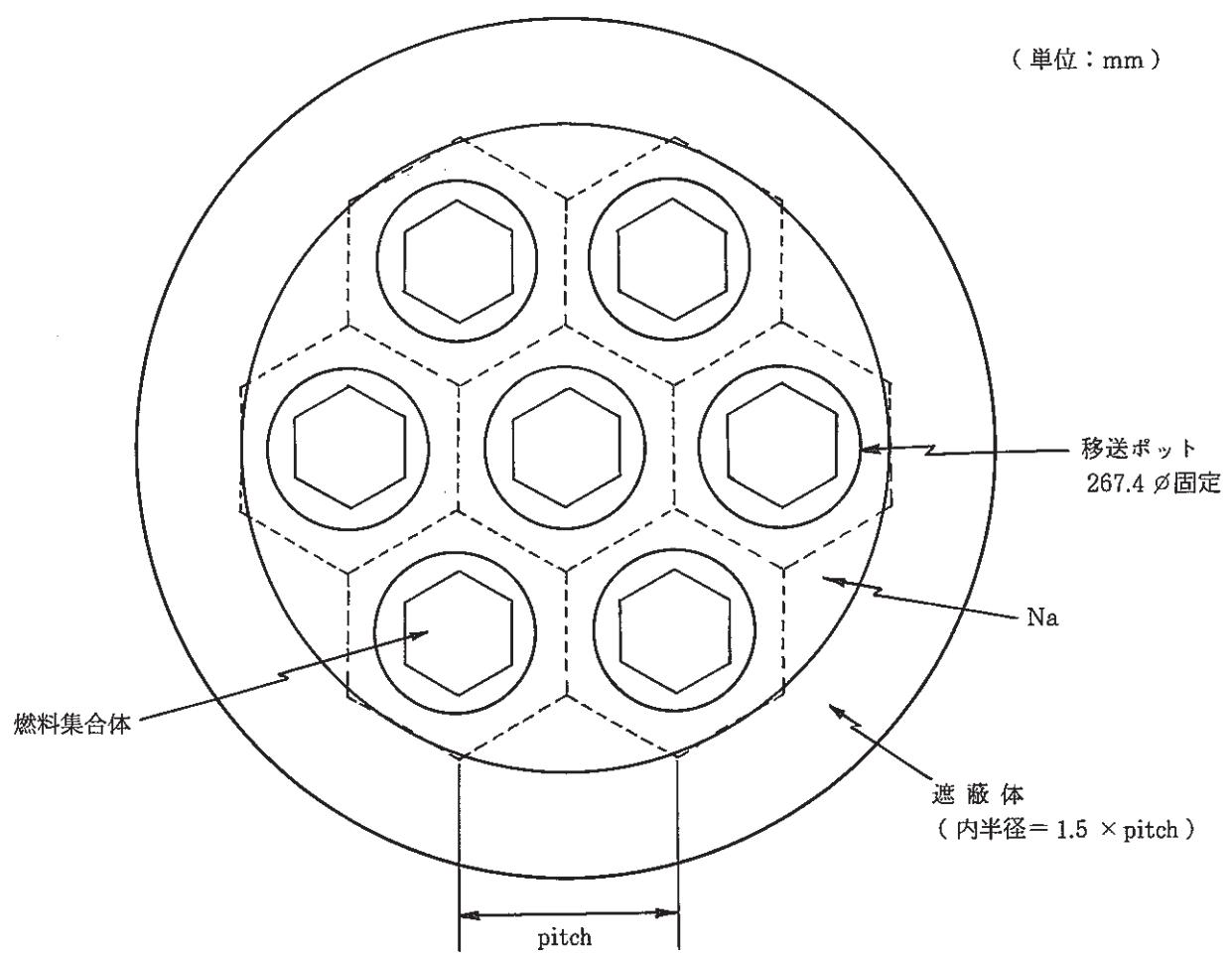


図 4.3-3 使用済燃料キャスクモデル

(ii) 目標実効増倍率

臨界安全性の判定基準 $K_{eff} < 0.95$ に計算誤差を考慮して $K_{eff} < 0.90$ を目標とする。

(3) 評価結果

移送ポット配列ピッチ，遮蔽材及びその厚さに対する実効増倍率を図 4.3-4 に示す（付
- 1 参照）。これより次のことがわかる。

- (i) 遮蔽体が無い場合は、移送ポット配列ピッチを約40cm以上にする必要がある。
- (ii) 臨界安全上、遮蔽材としては、SUS、鉛、ナトリウムの中では SUS が最も有利 (K_{eff} が小さくなる) で、以下、ナトリウム、SUS の順である。
- (iii) 実効増倍率は移送ポット配列ピッチに対して単調減少である。従って、臨界安全上最も
厳しくなる (K_{eff} が大きくなる) のは、配列ピッチを最小にした時、即ち、配列ピッチを
移送ポット外径に相当する 26.7 cm にとりキャスク内に移送ポットを隙間なく配列した時で
ある。この時でも、SUS 遮蔽体が 10cm あれば臨界安全の条件 ($K_{eff} < 0.90$) を満足でき
る。

移送ポット最小配列ピッチ 26.7 cm に余裕をとり 28 cm とした時、遮蔽体をそれぞれ SUS、
ナトリウム、鉛とした時の遮蔽厚さと実効増倍率の関係を図 4.3-5 に示す。これより次の
ことがわかる。

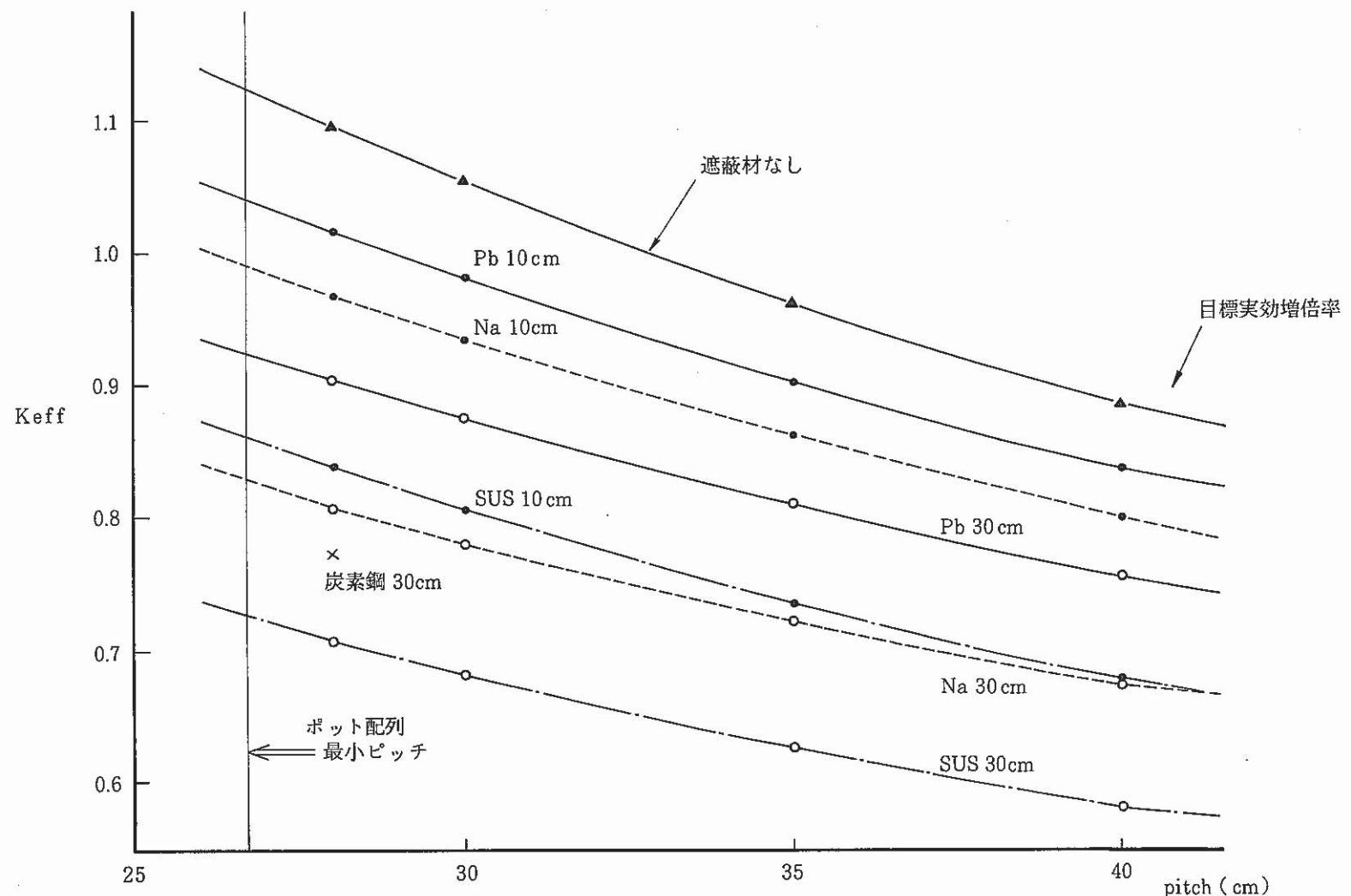


図 4.3-4 移送ポート配列ピッチ, 遮蔽材と実効増倍率

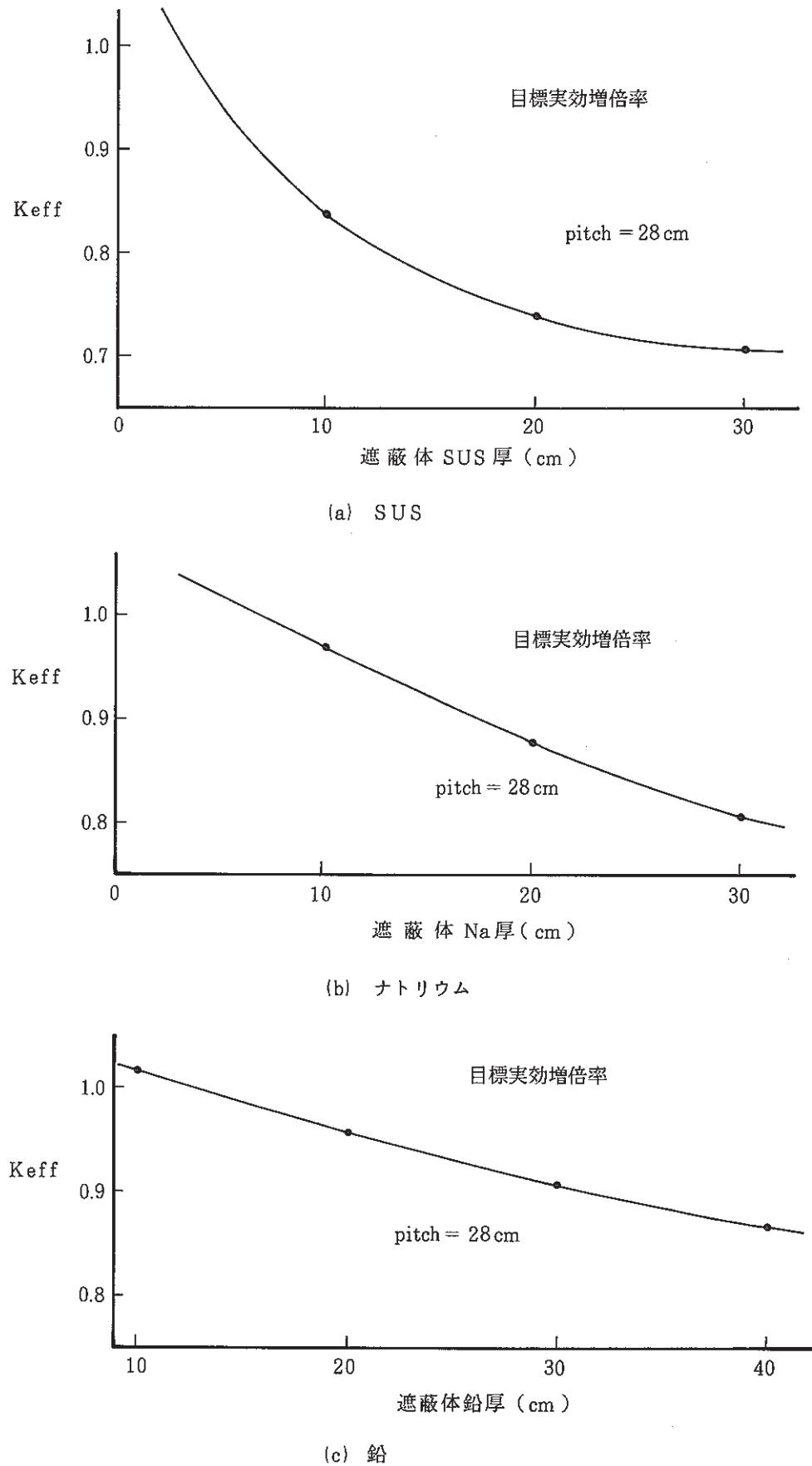


図 4.3-5 遮蔽体厚と実効増倍率

(iv) 移送ポット配列ピッチを28cmとした時、遮蔽厚さをSUSなら7cm、ナトリウムなら17.5cm、鉛なら31cmとすれば、臨界安全の条件 $K_{eff} < 0.90$ を満足できる。

なお、SUS、炭素鋼、ナトリウムの断面積を考えると、炭素鋼はSUSとナトリウムの間のSUSに近い位置にあることから、遮蔽材を炭素鋼とした場合は、遮蔽厚さを20cm程度とすれば十分未臨界を保てることがわかる。表4.3-2に遮蔽材の巨視的断面積を示す。

以上より、使用済燃料貯蔵キャスク内に移送ポットを28cmピッチの最近接に近い状態で配置し、かつキャスクもまた隙間なく配列貯蔵したとしても、SUSで10cm程度、炭素鋼で10~20cm程度、鉛で30cm程度の遮蔽体を設ければ、未臨界性は確保出来ることがわかった。

実際の使用済燃料貯蔵キャスクには、遮蔽上の必要から30~40cmの炭素鋼または鉛の遮蔽体が取り付けられると考えられるので、このようなキャスクであれば十分に未臨界性が確保出来ると考えられる。

表 4.3 - 2 遮蔽材の巨視的断面積

(cm⁻¹)

| | TOTAL | ABSORP | SCAT | 備 考 |
|---------|-------------|-------------|-------------|------------|
| SUS 316 | 2.80 E - 01 | 4.92 E - 04 | 2.05 E - 01 | T = 300 °K |
| SS 41 | 2.18 E - 01 | 4.17 E - 04 | 1.69 E - 01 | T = 500 °K |
| Na | 9.54 E - 02 | 6.79 E - 06 | 3.71 E - 02 | T = 397 °C |

407.6 ~ 368.8 keV

PNC N 241 84-02

高速炉基本領域の放射線減衰評価

ABSORP : 吸収断面積

SCAT : 散乱断面積

4.3.3 使用済燃料貯蔵キャスク遮蔽体構成の検討

使用済燃料を収納したキャスクを取扱うために必要なキャスク遮蔽体構成を検討する。

(1) 検討方法

使用済燃料貯蔵キャスク遮蔽体の材質及び厚さをパラメータとして、キャスクの放射線量率を計算する。計算は、再処理施設への搬出時期に合わせ燃料を収納してから2年以上経過している使用済燃料貯蔵キャスクについて行い、それ以前についてはキャスクを遠隔で取扱うものとして、遮蔽計算の対象としないものとした。

(2) 検討条件

(i) 設備条件

(a) 燃料集合体線源強度

以下に示すように炉停止2年後における内側炉心燃料集合体の線源強度を検討条件とする。

集合体1体あたりの線源強度(付-2参照)

直接 γ 線(FP及びActinide)* : $3.83 \times 10^{15} \gamma/\text{sec}$

中性子(自発核分裂及び(n, α)反応) : $9.01 \times 10^7 n/\text{sec}$

* 構造材の放射化による γ 線の寄与は小さいため無視

(b) 遮蔽材

以下の材料を遮蔽材として考慮した。

γ 線遮蔽材 : 炭素鋼、鉛

中性子遮蔽材 : ポリエチレン、ダウサム、水あるいはこれにボロンを添加したもの

(ii) 目標線量率

移動線源に対する基準を適用するものとし、それに安全係数として $1/3$ を乗じたものを遮蔽計算値に対する目標線量率とする。

目標線量率

キャスク外表面 : $200 \text{ mrem}/\text{hr} \times 1/3$

キャスク外表面より1mの位置 : $10 \text{ mrem}/\text{hr} \times 1/3$

(3) 検討結果

(i) 使用済燃料集合体1体収納キャスクの線量率計算

使用済燃料貯蔵キャスク中央部の基本的な遮蔽体構成を検討するため、キャスク中央部に1体の使用済燃料集合体が収納されているキャスクの表面線量率を計算した。表4.3-3に主要なケースについて計算結果を示す。また図4.3-6に線量率の径方向分布の例を示す。(付-3参照)

この結果から、ポリエチレンをはじめとした中性子遮蔽材は、中性子をよく減衰させる

一方、新たに2次 γ 線の発生源となるので、中性子遮蔽材より内側での直接 γ 線と中性子遮蔽材で発生する2次 γ 線のバランスを考えた遮蔽設計が必要であり、今回のように2次 γ 線が高い場合、内側の直接 γ 線遮蔽材は、あえて鉛とする必要がなく、炭素鋼で十分であるということがわかった。

表 4.3 - 3 キャスク表面線量率計算値

線量率単位 mrem/hr

| | 遮蔽体構成 | | 直接 γ 線源 線量率 | 中性子線源 | | | 全線量率 |
|---|----------------------------------|--------|-----------------------|----------|-----------------|----------|----------|
| | 遮蔽材 | 厚さ(cm) | | 中性子線量率 | 2次 γ 線量率 | 計 | |
| 1 | CS | 40 | 1.10(-2)* | 3.04(-4) | 5.96(-2) | 5.99(-2) | 7.09(-2) |
| | Poly | 25 | | | | | |
| | CS | 10 | | | | | |
| 2 | CS | 40 | 6.39(-3) | 3.07(-3) | 5.37(-3) | 8.44(-3) | 9.08(-3) |
| | Poly | 15 | | | | | |
| | CS | 20 | | | | | |
| 3 | CS | 40 | 6.07(-4) | 3.83(-3) | 7.91(-4) | 4.62(-3) | 5.23(-3) |
| | Poly(5% B_2O_3) | 15 | | | | | |
| | CS | 20 | | | | | |
| 4 | CS | 50 | 6.22(-4) | 2.27(-3) | 7.60(-3) | 9.87(-3) | 1.05(-2) |
| | Poly(5% B_2O_3) | 15 | | | | | |
| | CS | 10 | | | | | |
| 5 | CS | 50 | 7.16(-4) | 1.74(-2) | 7.15(-2) | 8.89(-2) | 8.96(-2) |
| | Dawtherm | 15 | | | | | |
| | CS | 10 | | | | | |
| 6 | CS | 50 | 6.44(-4) | 6.12(-3) | 6.14(-2) | 6.75(-2) | 6.81(-2) |
| | Water | 15 | | | | | |
| | CS | 10 | | | | | |
| 7 | CS | 50 | 6.44(-4) | 6.09(-3) | 5.17(-2) | 5.78(-2) | 5.84(-2) |
| | Water($^{90}B^{10}$) 20 ppm | 15 | | | | | |
| | CS | 10 | | | | | |
| 8 | CS | 50 | 6.19(-4) | 6.39(-3) | 6.07(-3) | 1.25(-2) | 1.89(-2) |
| | Water(95%)B | 15 | | | | | |
| | CS | 10 | | | | | |

$$* 1.10(-2) = 1.10 \times 10^{-2}$$

CS : 炭素鋼

Poly : ポリエチレン

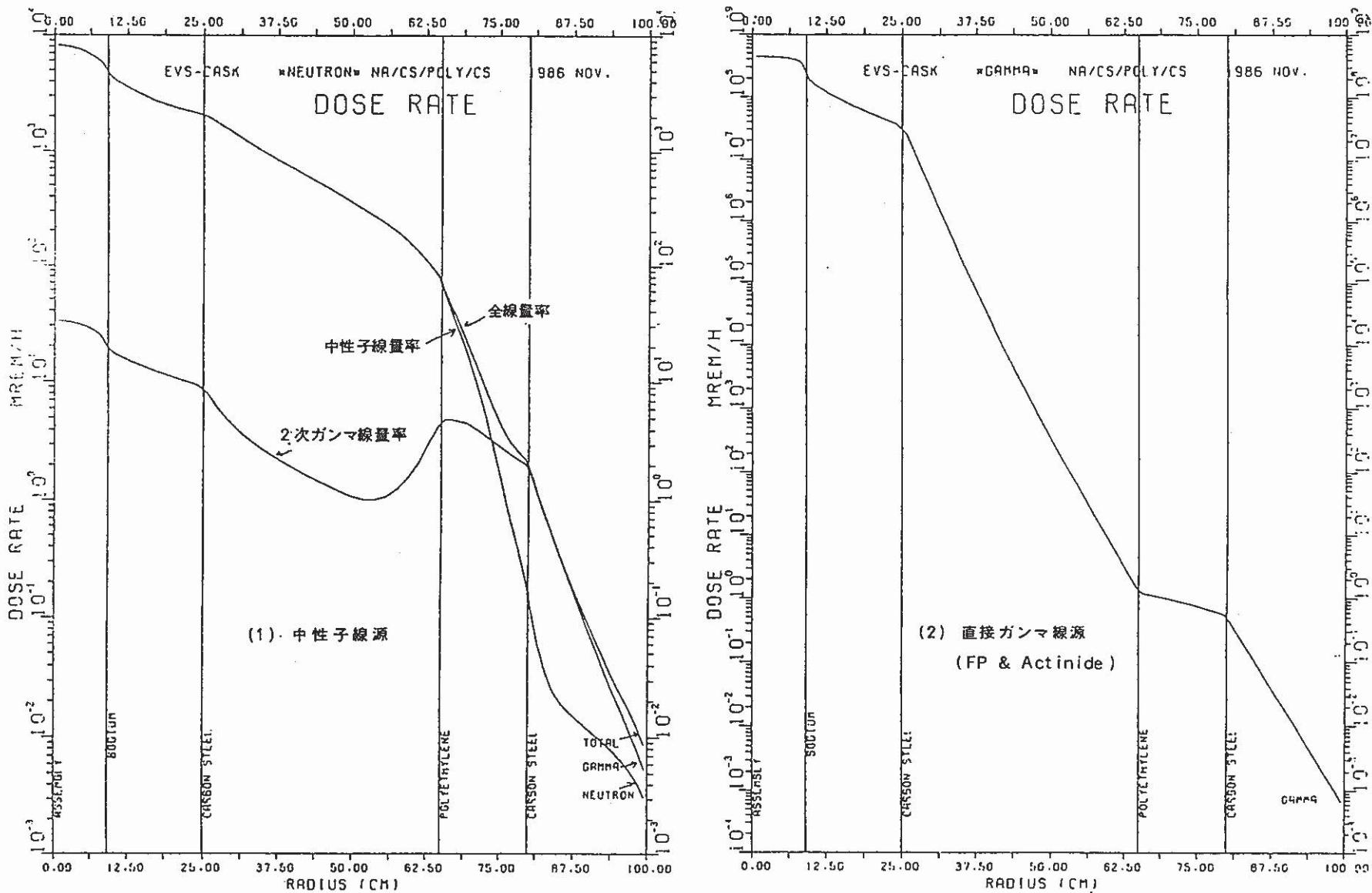


図 4.3-6 線量率径方向分布

(遮蔽体構成: CS 40 cm^t + Polyethylene (5% B₂O₃) 15 cm^t + CS)

(ii) 必要遮蔽厚の計算

(2)-(ii)で示した目標線量率は、キャスク表面より 1 m 位置 ($10\text{mrem}/\text{hr} \times \frac{1}{3}$) の方が厳しい。キャスク外径を 2 m とすると、キャスク表面より 1 m 位置の線量率から、キャスク表面の目標線量率を計算すると、

$$(10\text{mrem}/\text{hr} \times \frac{1}{3}) \times (\frac{2}{1})^2 = 13.3 \text{ mrem}/\text{hr}$$

となる。

このキャスク表面目標線量率を満足するために必要な遮蔽厚を計算した。計算に際しては、先行炉の遮蔽計算に準拠し、次の設計余裕を考慮した。

| | | |
|----------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 設計余裕 | | 計 6.0 |
| 解析条件 | 線源評価 最大燃焼度 軸方向ピーキング (1.3) | (1.6 ~ 1.7) (1.1 ~ 1.3) } 3.0 |
| 輸送計算不確かさ | | 2.0 |

必要遮蔽厚の計算結果を図 4.3-7 に示す。

図 4.3-7 には、使用済燃料を 7 体収納するキャスクの必要遮蔽厚も示した。この時、7 体収納することによりファクター 7 を、更に中性子増倍効果を考慮してファクター 2 を、1 体での線量率計算結果に乘じ、遮蔽厚を暫定的に求めた。

この結果から、目標線量率を満足する最小の遮蔽体構成として

集合体 1 体収納時 (評価値)

炭素鋼 40cm^t + 5 % B_2O_3 含有ポリエチレン 9cm^t

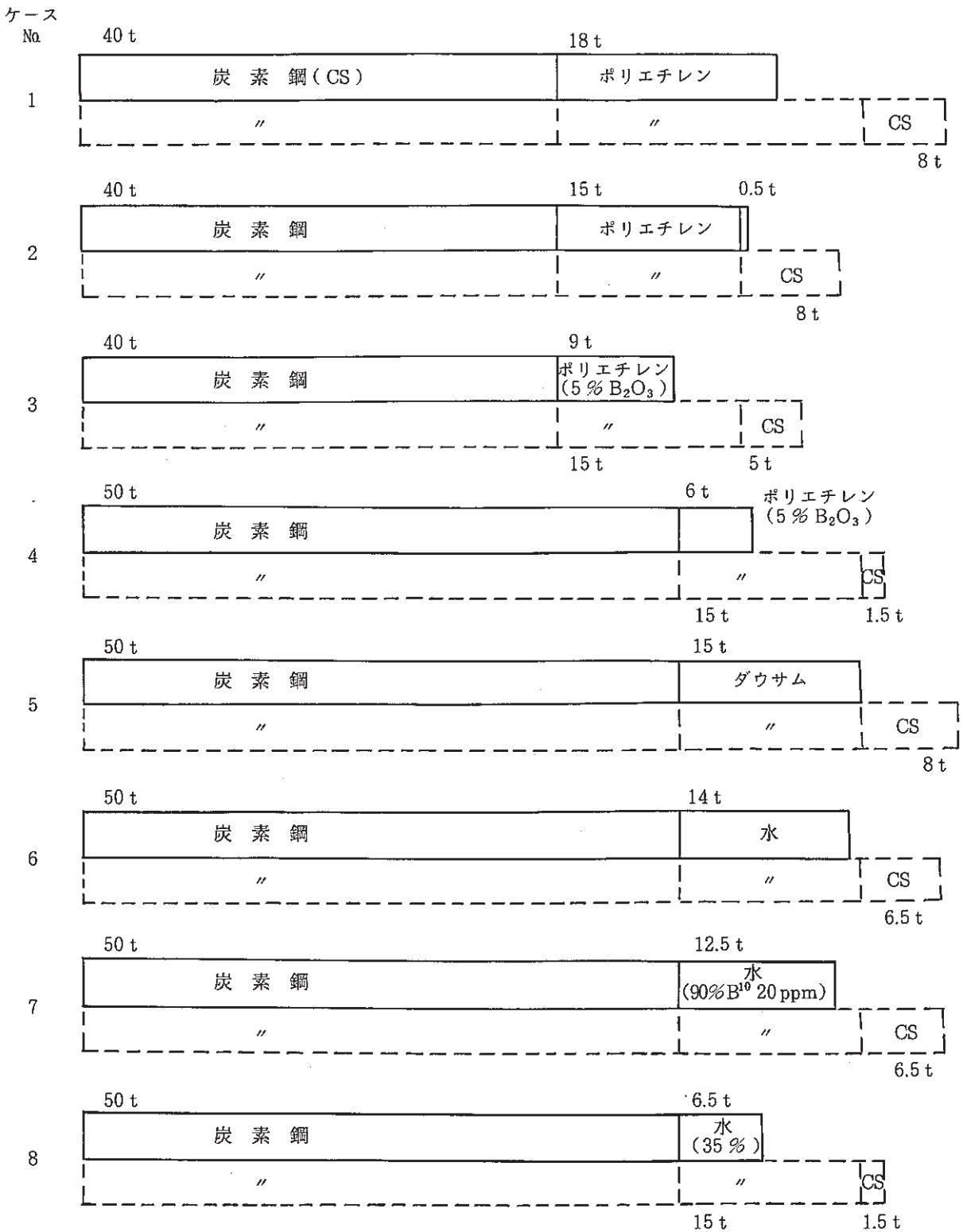
集合体 7 体収納時 (予想値)

炭素鋼 40cm^t + 5 % B_2O_3 含有ポリエチレン 15cm^t + 炭素鋼 5cm^t

を得た。

図 4.3-7 キャスク必要遮蔽厚

単位 cm



(iii) 遮蔽性能の確認

(ii)では、中性子増倍効果をファクター2と暫定することにより使用済燃料集合体を7体収納した時の必要最小遮蔽構成を予想した。ここでは、(ii)で予想した遮蔽体構成をもとに、使用済燃料7体収納時の実効増倍率を求め、それによって中性子増倍効果を考慮した上で、(ii)で予想した遮蔽体構成を持つキャスクが目標線量率を満足するか確認した。

計算に使用したキャスク構造を図4.3-8に示す。遮蔽体構成は、(ii)の予想値をもとに中性子遮蔽体として5% B_2O_3 含有ポリエチレン15cm^t、外側遮蔽体として炭素鋼5cm^tを設定し、内側遮蔽体については、炭素鋼30cm^t、40cm^t、50cm^t(ただし、それぞれ内側2cmは内容器としてSUS304とする)の3ケースにパラメータを振った。

計算は、キャスク中央断面上の径方向1次元モデルで行い、実効増倍率の計算については、内側遮蔽体外表面までをモデル化し、この外表面で反射するとした保守的条件を採用した。また、遮蔽計算については、外側遮蔽体表面までをモデル化し、キャスク1体分のみの線量率評価を行った。

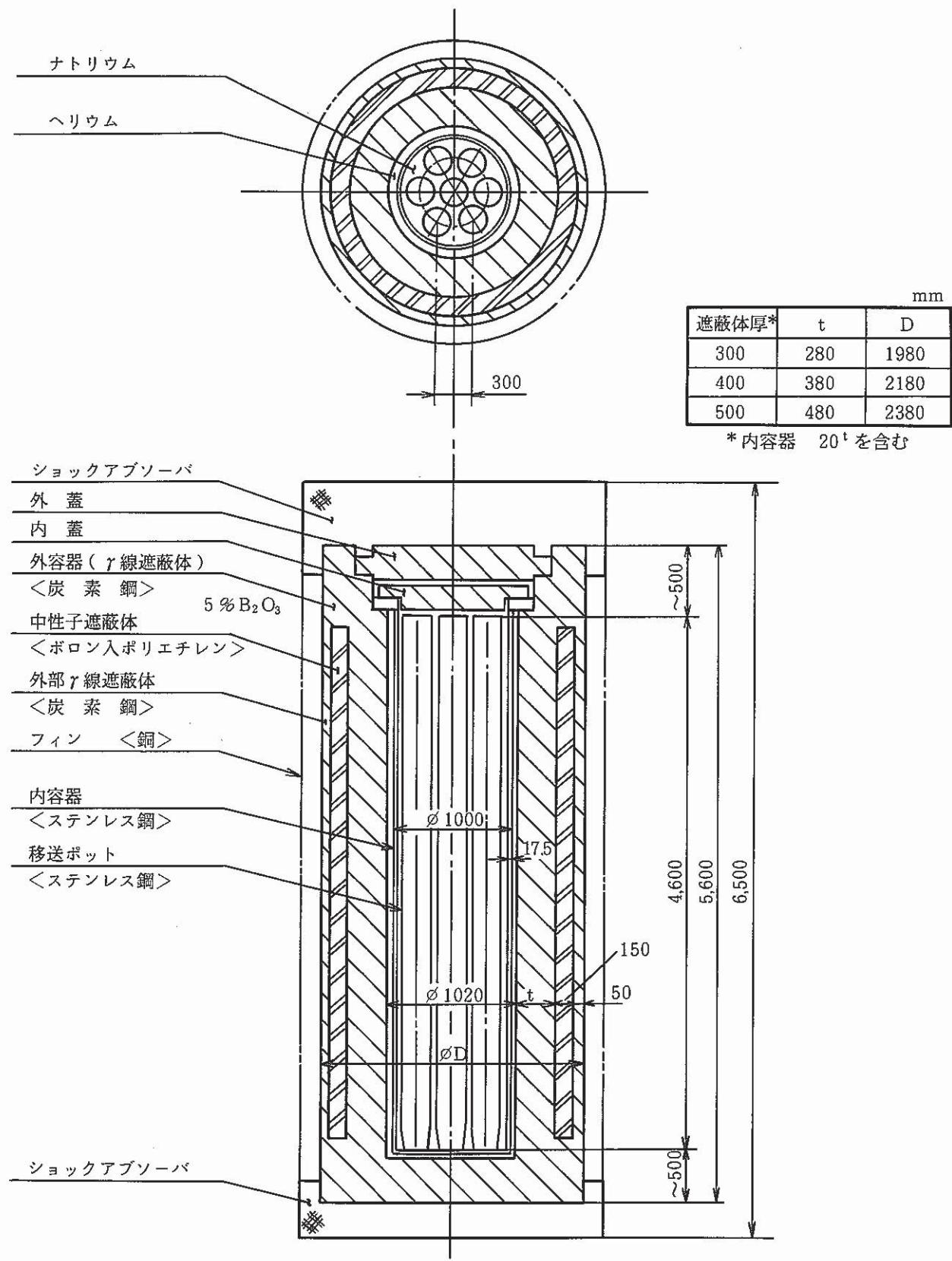


図 4.3-8 ナトリウムキャスク構造図

表 4.3-4 に、中性子増倍効果を考慮しない場合のキャスク表面線量率及び増倍率の計算結果を示す。

この計算結果に、設計余裕、中性子増倍効果を考慮して、次のような変換を施す。

- 増倍率を K_{eff} とすると、中性子線源強度は $(\frac{1}{1-K_{eff}})$ 倍になる。

→ 中性子による表面線量率の計算結果に $(\frac{1}{1-K_{eff}})$ を乗じる。

- 設計余裕としてファクター 6 を考慮する。
→ 表面線量率の計算結果に 6 を乗じる。
- キャスク半径を R m とすると、キャスク表面より 1 m 離れた点での線量率は、表面線量率の $(\frac{R}{1+R})^2$ 倍になる。

→ 表面線量率の計算結果に $(\frac{R}{R+1})^2$ を乗じる。

以上のような変換を施した計算結果を表 4.3-5 に示す。

先にも記したようにキャスク搬出時には移動線源に対する基準が適用されるものとし、これに安全ファクターとして $\frac{1}{3}$ を考慮したものを遮蔽計算設計値に対する目標線量率とする。

目標線量率

| | |
|-----------------|--|
| キャスク外表面 | $200 \text{ mrem/hr} \times \frac{1}{3}$ |
| キャスク外表面より 1 m 外 | $10 \text{ mrem/hr} \times \frac{1}{3}$ |

表 4.3-5 より遮蔽の内側ア線遮蔽体厚 $t_f = 40\text{cm}$ で、キャスク外表面及びキャスクより 1 m 外の点両方に於いて目標線量率を満足している。

従って、使用済燃料を 7 体収納したキャスクにおいてその遮蔽体構成を内側より

炭素鋼 $40\text{cm}^t + 5\% \text{B}_2\text{O}_3$ ポリエチレン $15\text{cm}^t +$ 炭素鋼 5cm^t
とすると目標線量率が充分満足されることが確認された。

表 4.3-4 増倍率および表面線量率計算値

* 増倍効果含めず

| 内側 γ 線遮蔽体厚 (cm) | 30 | 40 | 50 | |
|------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 増倍率 (Keff) | 0.7150 | 0.6971 | 0.6888 | |
| 表面 線量率 mrem/hr | 直接 γ 線 | 1.25×10^1 | 3.66×10^{-1} | 1.22×10^{-2} |
| | 中性子 | 1.36×10^{-1} | 3.45×10^{-2} | 1.07×10^{-2} |
| | 2次 γ 線 | 2.30×10^{-1} | 1.61×10^{-1} | 1.14×10^{-1} |
| | 計 | 1.29×10^1 | 5.62×10^{-1} | 1.37×10^{-1} |

表 4.3-5 キャスク線量率設計値

線量率単位 : mrem/hr

| 内側 γ 線遮蔽体厚 (cm) | 30 | 40 | 50 | |
|------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| 表面 線量率 | 直接 γ 線 | 7.50×10^1 | 2.20×10^0 | 7.32×10^{-2} |
| | 中性子 | 2.86×10^0 | 6.83×10^{-1} | 2.06×10^{-1} |
| | 2次 γ 線 | 4.84×10^0 | 3.19×10^0 | 2.20×10^0 |
| | 計 | 8.27×10^1 | 6.07×10^0 | 2.48×10^0 |
| 1 m 離れた点の線量率 | 2.05×10^1 | 1.65×10^0 | 7.32×10^{-1} | |

4.3.4 使用済燃料貯蔵キャスク除熱性評価

使用済燃料集合体を収納したキャスクを自然通風で冷却する場合の除熱性を評価する。

(1) 評価方法

キャスク内に貯蔵している使用済燃料の総発熱率に対する燃料被覆管最高温度を計算する。

(計算手法は付-4)

(2) 評価条件

(i) キャスク内貯蔵使用済燃料の総発熱率 : 3 ~ 60 kW

(ii) 温度条件

(a) 燃料貯蔵建屋内空気温度 : 32 °C

(b) 燃料の制限温度

・通常時および異常な過渡変化時 : 550 °C

事故時 : 675 °C

(iii) 流体および流量

ナトリウムポット内：ナトリウム／集合体内外の自然循環

内容器内 : ナトリウム／スタグナント

外容器～内容器間 : ヘリウム／スタグナント（ギャップ無しのケースも検討）

キャスク外 : 空気／自然通風

キャスク1体当たりの風量は、パラメータとし

1000~15000 kg/h.

(iv) 中性子遮蔽体の材質、厚さ

ポリエチレン、150 mm厚

ただし、高密度のポリエチレン材とし、軟化に至る温度は 200 °Cとする。（原子炉材料ハンドブック、日刊工業新聞社、p. 749）

(v) 伝熱促進対策

伝熱促進対策としてキャスク外面にフィンを設置するものとした。キャスクはたて置きを前提として、たてに平板のフィンを設ける構造とした。（図4.3-9）

また、ポリエチレン層の大きな熱抵抗を緩和するために、同層内に炭素鋼の平板を渡す構造とした。（図4.3-9）

付-5にこれに対する伝熱モデルを示す。

(3) 評価結果

キャスクの外側を流れる空気の通風量をパラメータとした、キャスク内使用済燃料の総発熱率に対する燃料被覆管最高温度の計算結果を図4.3-10に示す。図には、外容器と内容器の間のヘリウムガスギャップを無くした場合の計算結果もあわせて示した。

また、中性子遮蔽体であるポリエチレンの最高温度を図4.3-11に示す。

キャスクの通風を自然通風で行う場合、通風量はキャスク内使用済燃料の総発熱率に関する。図4.3-12にその関係を示す（付-6参照）。

キャスク内使用済燃料の総発熱率が定まれば、図4.3-12より自然通風量が決まり、更に図4.3-10より使用済燃料の被覆管温度が求まる。

ところで、図4.3-10で通風量が5000 kg/hrと15000 kg/hrでは、燃料被覆管温度の評価上大差ないことがわかる。図4.3-12より、自然通風量5000 kg/hrに相当する発熱率は10 kWであるが、それ以上の発熱率では、図4.2-10に於いて、通風量を5000 kg/hrと考えておけば、自然通風冷却による被覆管温度評価上は安全側で大差ない結果が得られるものと考えられる。

図4.3-10より、燃料被覆管最高温度が通常時目やす制限温度550°Cを満たすキャスク内使用済燃料の総発熱率は約39 kWである。また、何らかの方法でヘリウムガスギャップを無くすることが出来れば、62 kWまで使用済燃料を貯蔵することが出来る。

ただし、キャスク内使用済燃料の総発熱率が30 kWを越えると、中性子遮蔽材のポリエチレン温度が目やす制限温度200°Cを越えるため耐熱性の高い中性子遮蔽材が必要である（図4.3-11）。

以上より、中性子遮蔽材の耐熱性の問題が解決されたとしても、原子炉停止後2週間経過した使用済燃料（発熱量20 kW）は、ヘリウムガスギャップのあるキャスクには1～2体、ヘリウムガスギャップのないキャスクでも3体しか収納出来ない。

逆にキャスク内に7体の使用済燃料を収納するためには、使用済燃料1体あたりの発熱率でヘリウムガスギャップのあるキャスクの場合39kW/7体即ち5.6 kW、ヘリウムガスギャップの無いキャスクの場合62 kW/7体即ち8.9 kWになるまで崩壊熱を減衰させてやる必要がある。これは原子炉が停止してから、それぞれ160日後、76日後である（図4.1-1）。

図4.3-13にキャスク1体に収納可能な使用済燃料集合体数を示す。

なお、図4.3-10の結果は、キャスク内に収納された使用済燃料が発熱率一定のまま定常状態に至った場合の温度である。原子炉内ナトリウム（200°C）中より使用済燃料が取出されキャスク内に収納されるまでの移送経路では、ポット外面断熱という厳しい条件を規定しても、燃料被覆管の温度上昇は発熱率60 kWにおいても約250°Cであり（移送時間約20分、ポット内熱容量70 kcal/°C〔付-7参照〕）、移送中に550°Cを越えることはない。

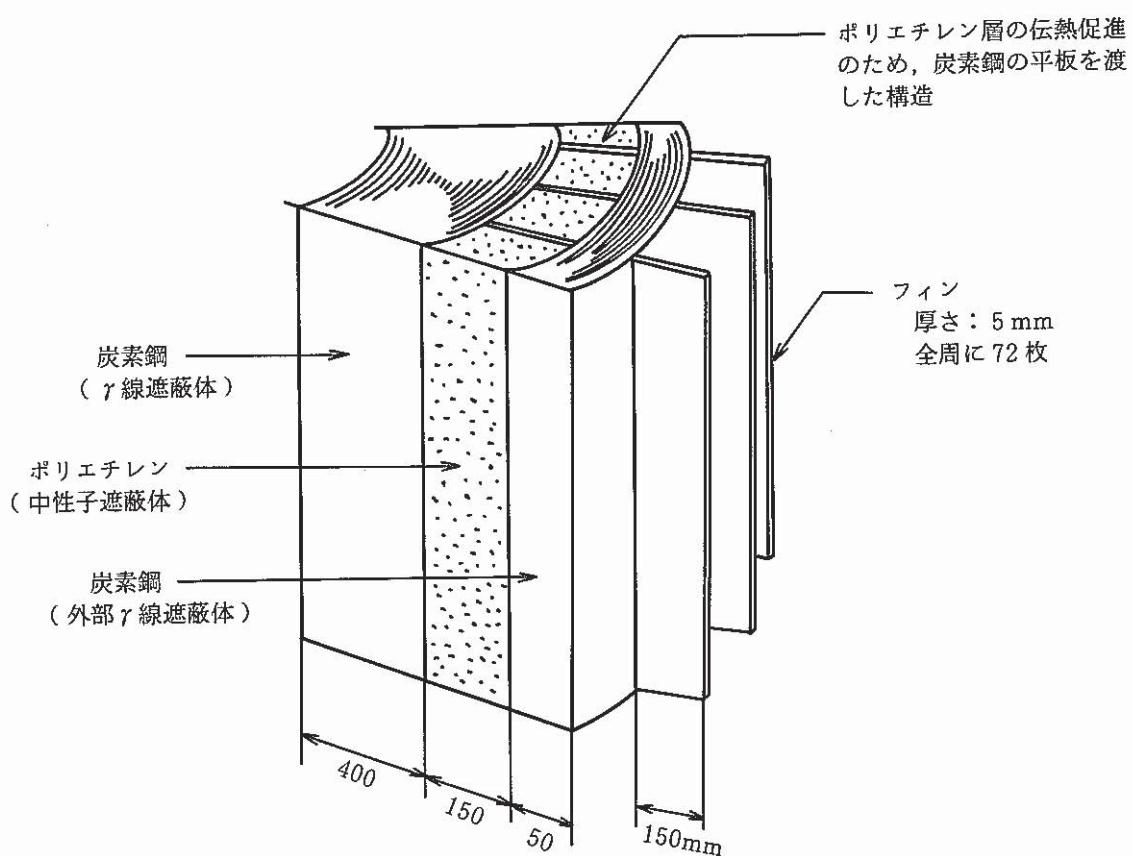


図 4.3-9 フィンおよびポリエチレン層伝熱促進構造

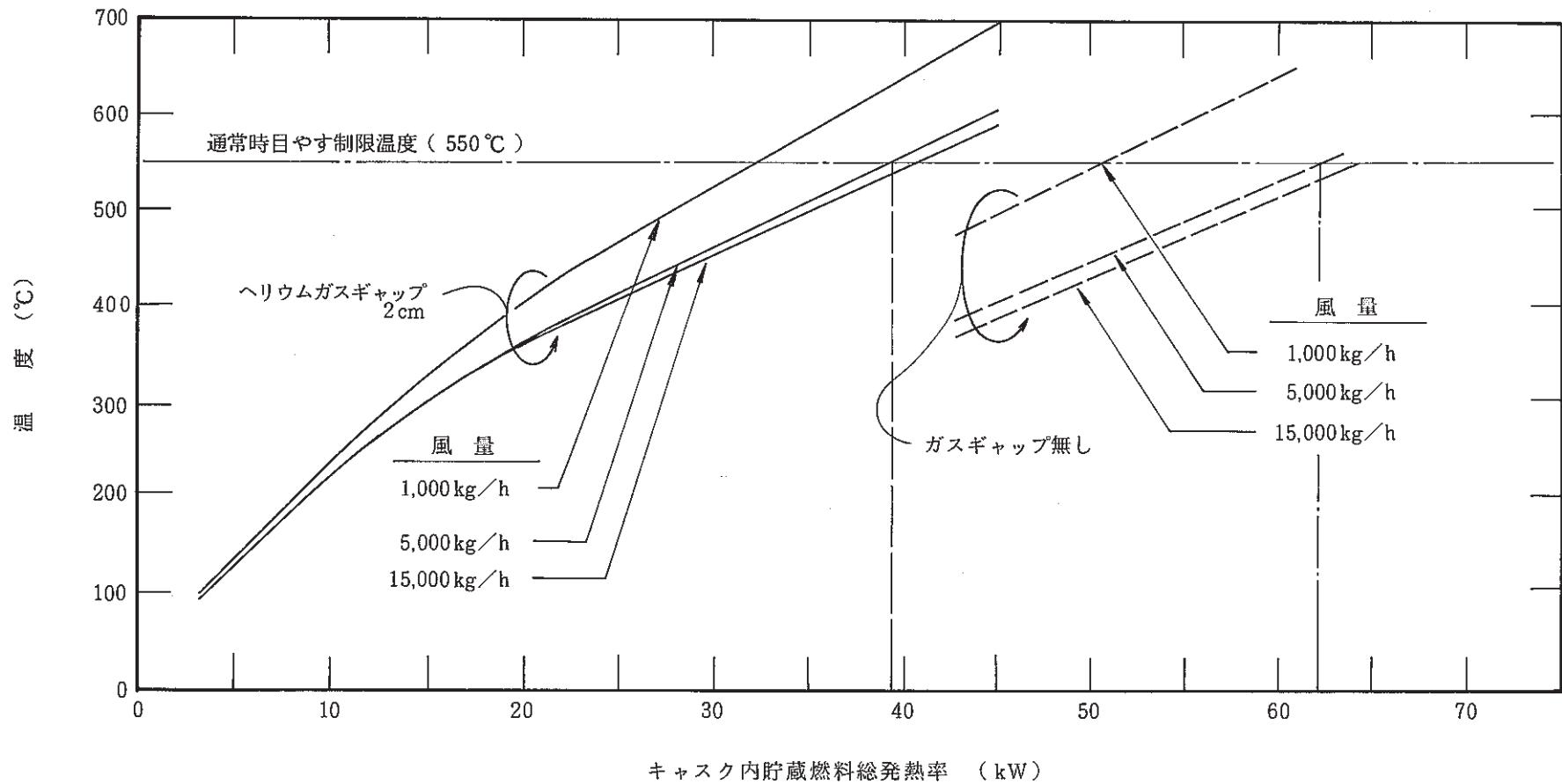


図 4.3-10 発熱率と燃料被覆管最高温度との関係

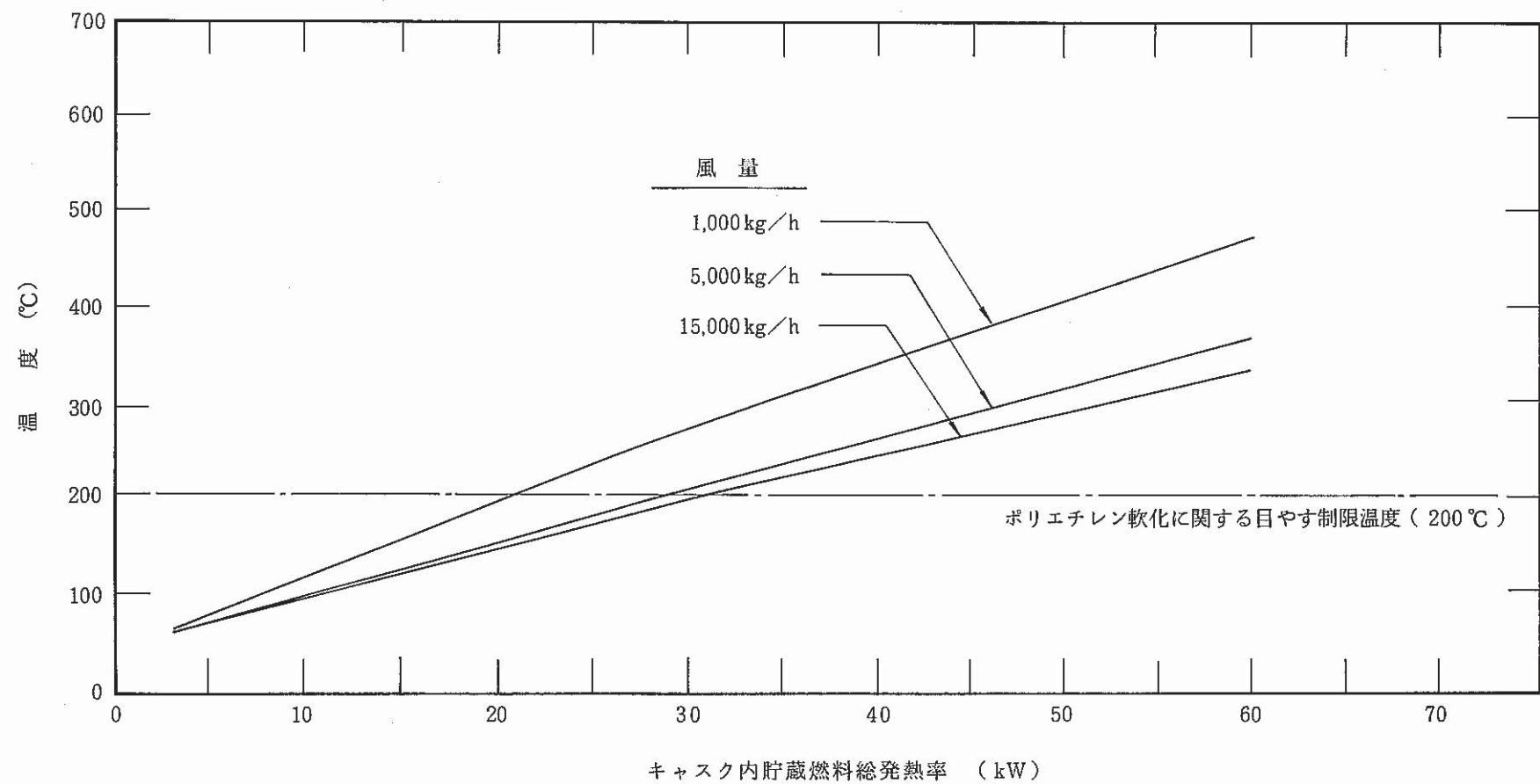


図 4.3-11 発熱率とポリエチレン最高温度との関係

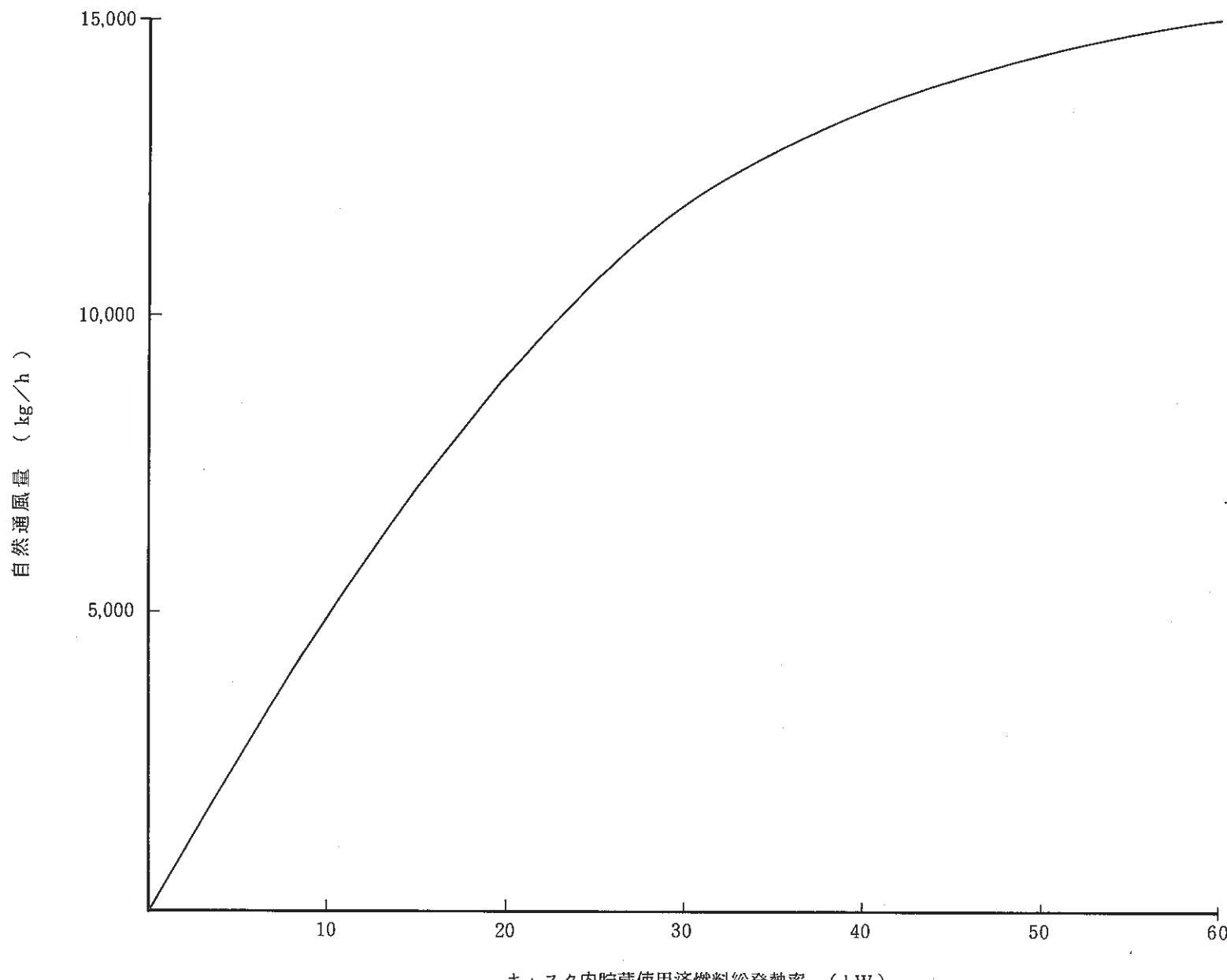


図 4.3-12 発熱率とキャスク自然通風量の関係

| 炉停止後日数 | | 3 | 4 | 5 | 14 | 24 | 35 | 39 | 58 | 64 | 76 | 94 | 130 | 160 | | | |
|-----------------------|----------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|----|--|----|
| ヘリウムガスキャップ ありのキヤスク | 炉心燃料 | | | | 1体 | | 2体 | | 3体 | | 4体 | | 5体 | | 6体 | | 7体 |
| | プランケット燃料 | | 5体 | 6体 | | 7体 | | | | | | | | | | | |
| ヘリウムガスキャップ なしのキヤスク | 炉心燃料 | | | 2体 | | 3体 | | 4体 | | 5体 | | 6体 | | 7体 | | | |
| | プランケット燃料 | | | | 7体 | | | | | | | | | | | | |

図 4.3 - 13 キャスク 1体に収納可能な使用済燃料集合体数

4.4 ナトリウムポット EVS 方式の成立性評価

ナトリウムポット EVS 方式による燃料取扱系の成立性を評価するため Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式、保持筒内ナトリウムポット EVS 方式の両方式について、

- ① 未臨界性評価
- ② 遮蔽構成検討
- ③ 除熱性評価
- ④ 異常事象解析
- ⑤ 物量評価

を行った。

4.4.1 ナトリウムポット及びポット貯蔵設備の基本体系

ナトリウムポット EVS 方式による燃料取扱系の成立性を評価するにあたって、以下の方針に従い、ナトリウムポット及びポット貯蔵部の基本体系を定めた。

- ① ポットには高崩壊熱燃料が収納されるので、ポットはナトリウム入りポットとする。
- ② 使用済燃料は常にポットに入れられた状態で移送貯蔵される。燃料移送に用いられる移送ポットをそのまま燃料の貯蔵に用いるものとする。
- ③ 移送ポットは、燃料が 1 体収納出来るステンレス鋼製の容器で、Ar ガスセル内移送機（インセルクレーン）で取扱うため、上部にハンドリングヘッドを有する構造とする。図 4.4-1 に移送ポットの概念図を示す。

ハンドリングヘッド部には、サイフォンを設け、原子炉容器内でナトリウム中より引き上げる際に移送ポット内のナトリウム液位が一定レベルまで下がるようにし、インセルクレーンで取扱う際にグリッパが直接ナトリウムに浸漬されることを防止するものとする。

また移送ポット外表面はふく射による除熱を促進するため、ブラッククロムメッキまたはクロムカーバイト爆発溶射を行ない、ふく射率の改善をはかるものとする。

- ④ Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式に於ける貯蔵設備は、Ar ガスセル内に設置された開放型の貯蔵ラックとする。使用済燃料はナトリウム入りの移送ポットに収納された状態で貯蔵ラック中に貯蔵されるものとする。

使用済燃料の崩壊熱は、セル内の Ar ガスの自然対流または強制対流により移送ポット外表面を直接冷却することで除去される。

図 4.4-2 に Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式の貯蔵部概念を示す。

- ⑤ 保持筒内ナトリウムポット EVS 方式に於ける貯蔵設備は、Ar ガスセル床面より吊下げられた保持筒とする。使用済燃料はナトリウム入りの移送ポットに収納された状態で保持筒内に貯蔵されるものとする。

使用済燃料の崩壊熱は、保持筒外面の空気の自然通風または強制通風により除去される。

保持筒内は Ar ガスセルと連通しており、スタグナントの Ar ガスで満されている。移送ポットと保持筒間は、ふく射により伝熱が行われる。

図 4.4-3 に保持筒内ナトリウムポット EVS 方式の貯蔵部概念を示す。

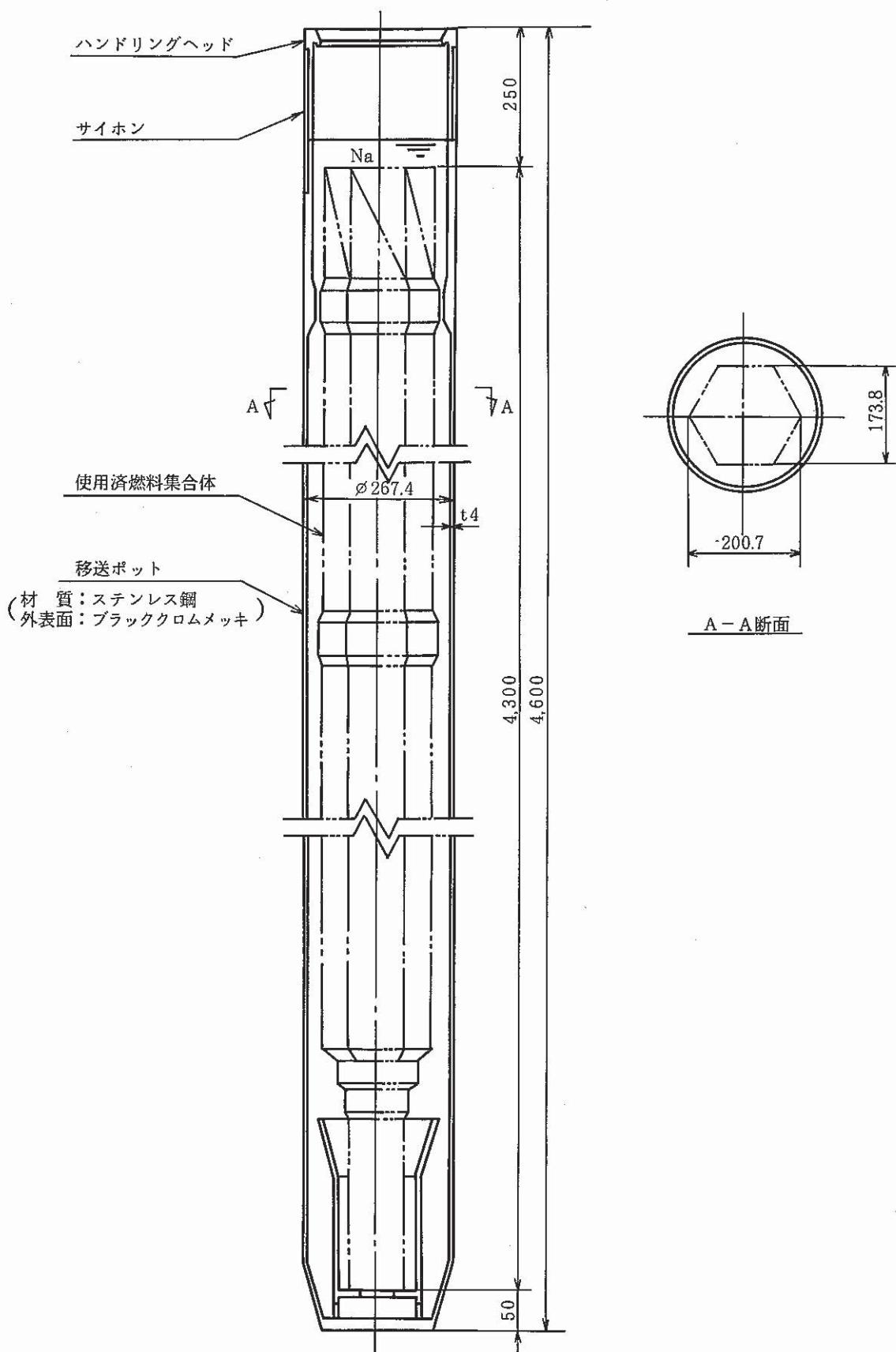


図 4.4 - 1 使用済燃料移送ポート概念図

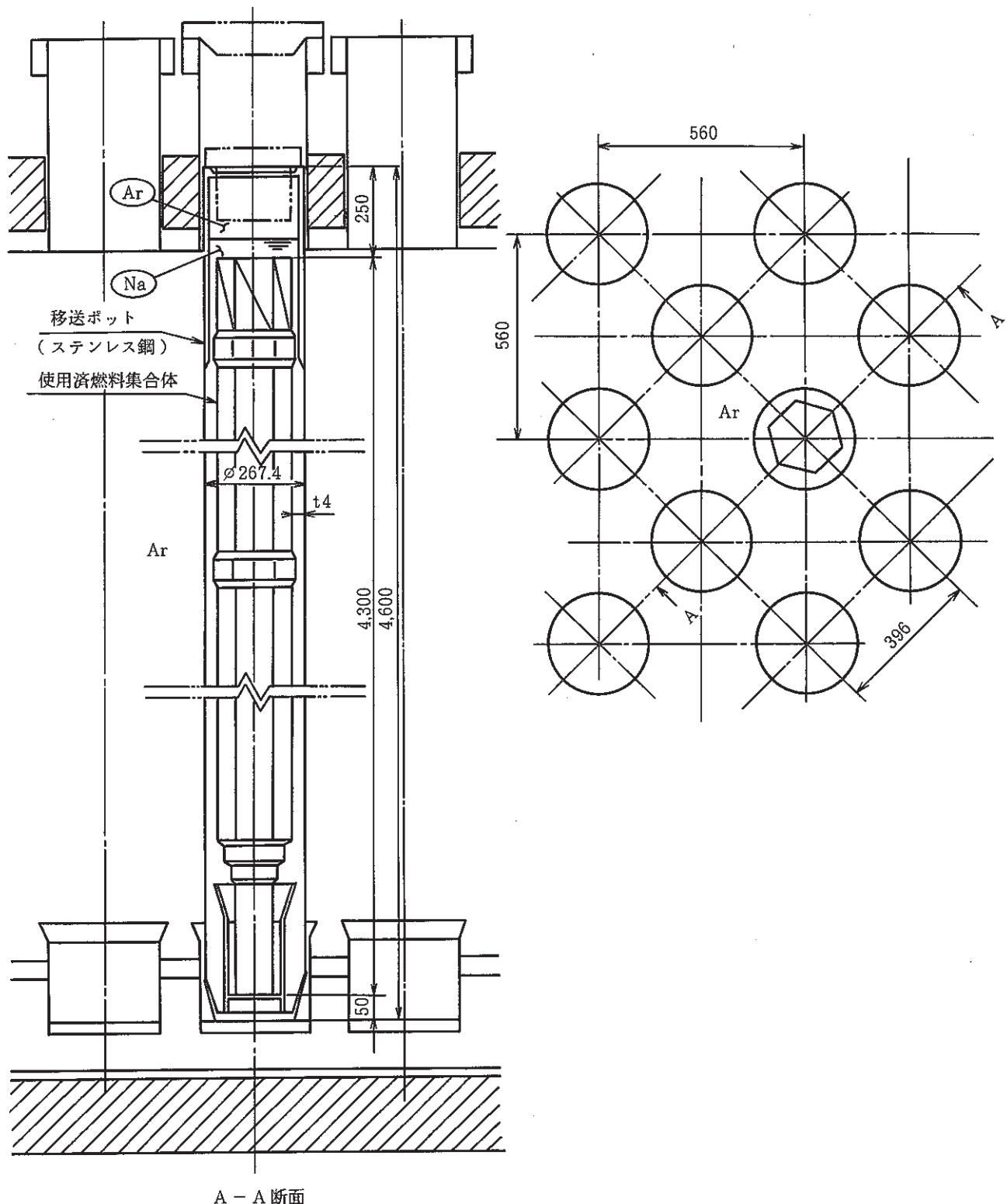


図 4.4-2 Ar ガスセル内ナトリウムポット
EVS 方式貯蔵部概念

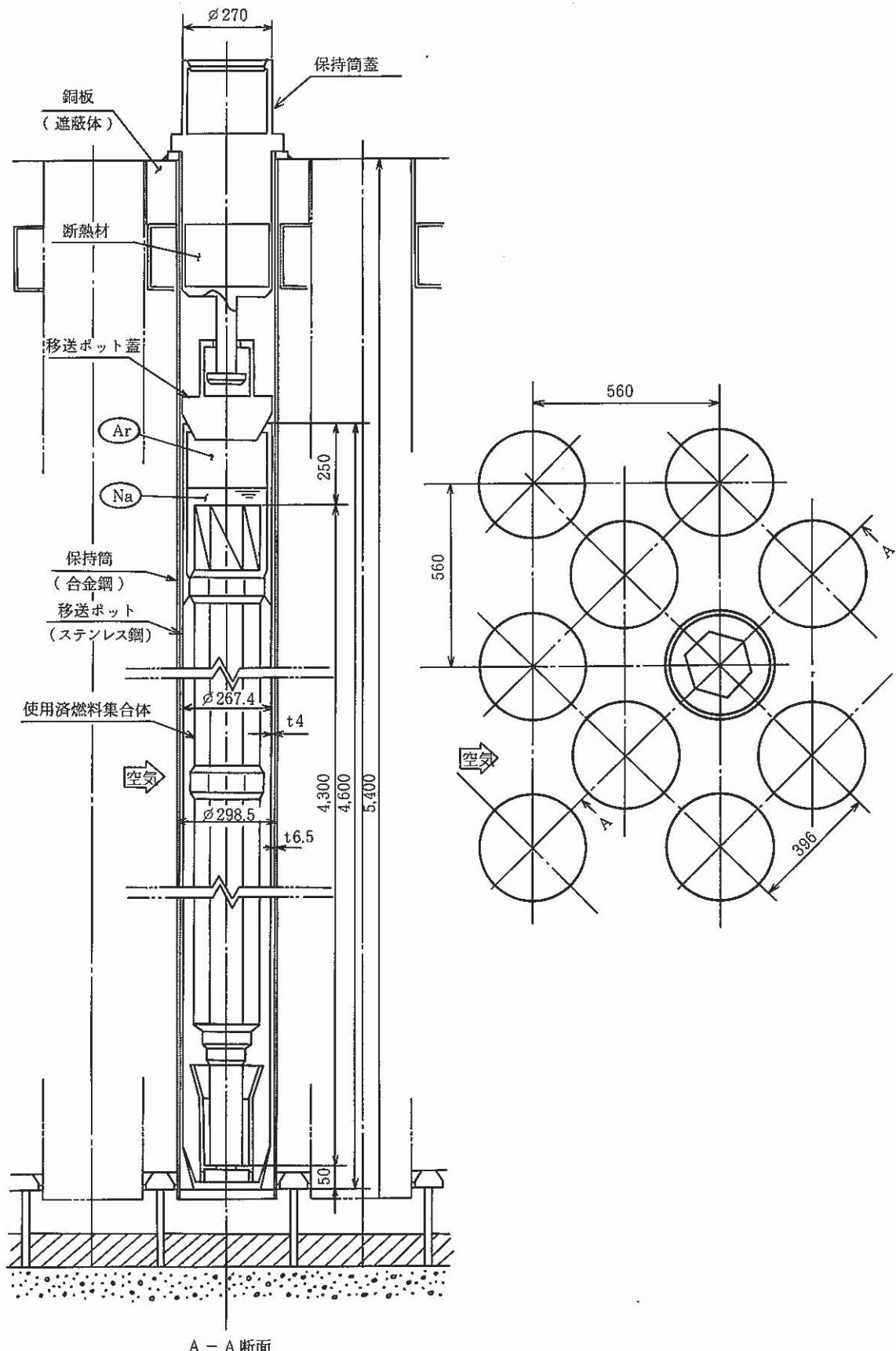


図 4.4-3 保持筒内ナトリウムポット EVS
方式貯蔵部概念

4.4.2 ナトリウムポット EVS 方式の未臨界性評価

ナトリウムポット EVS 方式の 2 方式、すなわち Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式及び保持筒内ナトリウムポット EVS 方式について、未臨界性を評価した。

(1) 評価方法

使用済燃料配列ピッチ、及び貯蔵設備コンクリート壁厚に対する実効増倍率を計算する。

(2) 評価条件

(i) 設備条件

(a) 燃料集合体

Pu 富化度 21.2 w/o の燃料を想定する。この時の原子数密度は表 4.3 - 1 (使用済燃料貯蔵キャスクの未臨界性評価条件と同様) に示す。

体系の温度を保守的評価を行うため 100 °C に設定した。

(b) 移送ポット

外径 26.74 cm 内筒状、肉厚 0.4 cm で、内部はナトリウムで満たされているものとする。材質は STPA 24 とする。

(c) 貯蔵設備

◦ Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式

使用済燃料は移送ポットに入れられた状態で Ar ガスセル内の貯蔵ラックに配列貯蔵される。

◦ 保持筒内ナトリウムポット EVS 方式

使用済燃料は移送ポットに入れられた状態で Ar ガスセルから吊り下げられている保持筒内に貯蔵される。保持筒は外径 29.85 cm 円筒状、肉厚 0.65 cm で、内部は Ar ガスで満たされているものとする。材質は STPA 24 とする。

(d) 配列

Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式、保持筒内ナトリウムポット EVS 方式いずれの場合でも、集合体 13 体 × 13 体 = 169 体の正方配列とする。

(ii) 目標実効増倍率

臨界安全性の判定基準 $K_{eff} < 0.95$ に計算誤差を考慮して、 $K_{eff} < 0.90$ を目標とする。

(3) 評価結果

(i) 保持筒内ナトリウムポット EVS 方式

(a) 配列ピッチ、水密度に対する実効増倍率の変化の 1 次元解析結果を図 4.4 - 4 に示す (付 - 8 参照)。

配列ピッチ 35 cm、水密度 0.1 g/cc を中心として臨界性を検討すべきことが判る。

(b) 配列ピッチ、水密度に対する実効増倍率の 3 次元解析結果を図 4.4 - 5 に示す。この計算結果はコンクリート壁厚 50 cm に対するものである。

これより以下のことことがわかる。

- 各ピッチに対して実効増倍率が最大になるのは水密度ゼロの空気雰囲気の場合である。
- ピッチ35cmのとき、空気雰囲気での実効増倍率は $K_{eff} = 0.8844 \pm 0.0078$ であり、 3σ の統計誤差を考慮した最も安全側の評価でも実効増倍率は $K_{eff} = 0.908$ となり、条件 $K_{eff} < 0.9$ をわずかに越えるだけである。

(c) コンクリート壁厚を 100 cmとした場合の解析を行い、その効果を明らかにした。結果を表 4.4-1 に示す。これより以下のことことがわかる。

- コンクリート壁を 100 cmとしても、 $K_{eff} = 0.8781 \pm 0.0052$ である。壁厚50cmの結果 $K_{eff} = 0.8844 \pm 0.0078$ とは誤差程度の差であり、有意な違いはないとみなせる。従ってコンクリート厚50cmで既に実効増倍率への効果は飽和しており、壁厚50cmで十分と判断できる。

(ii) Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式

ピッチ35cm、コンクリート壁厚50cmの場合の実効増倍率の3次元解析結果を表 4.4-1 に示す。これより以下のことことがわかる。

- この方式は保持筒内貯蔵方式に比べ～1.4% A K程度実効増倍率が小となる。
- ピッチ35cm、コンクリート壁厚50cmの場合、実効増倍率は $K_{eff} = 0.8702 \pm 0.0080$ である。 3σ の統計誤差を考慮しても、実効増倍率は $K_{eff} = 0.894$ であり、条件 ($K_{eff} < 0.9$) を満たす。

以上より、EVS 壁についてコンクリート厚さ50cm程度を縦方向、横方向に仮定した場合でも、13体×13体のポットの正方配列の場合、約35cm以上のピッチとすれば、保持筒内ナトリウムポット EVS 方式及び Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式のいずれにおいても、臨界安全性の条件を満たすことができる事がわかる。なお、後者的方式が臨界安全上わずかに有利であるが、配列ピッチに有為な差をもたらす程ではない。

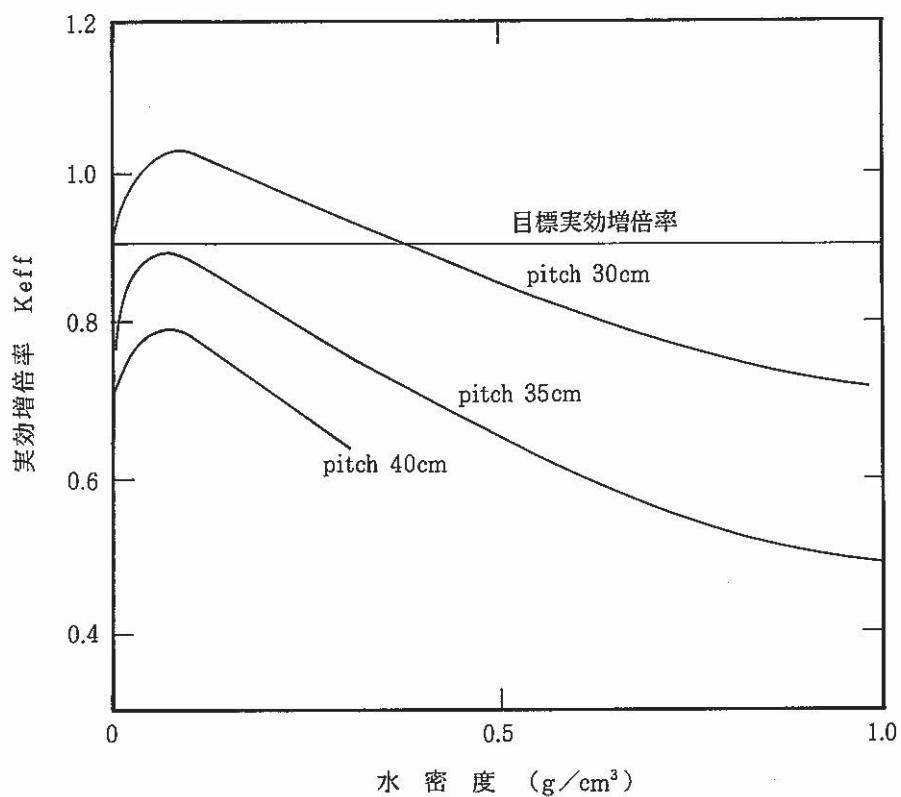


図 4.4-4 1次元解析による実効増倍率（保持筒内
ナトリウムポット EVS 方式）

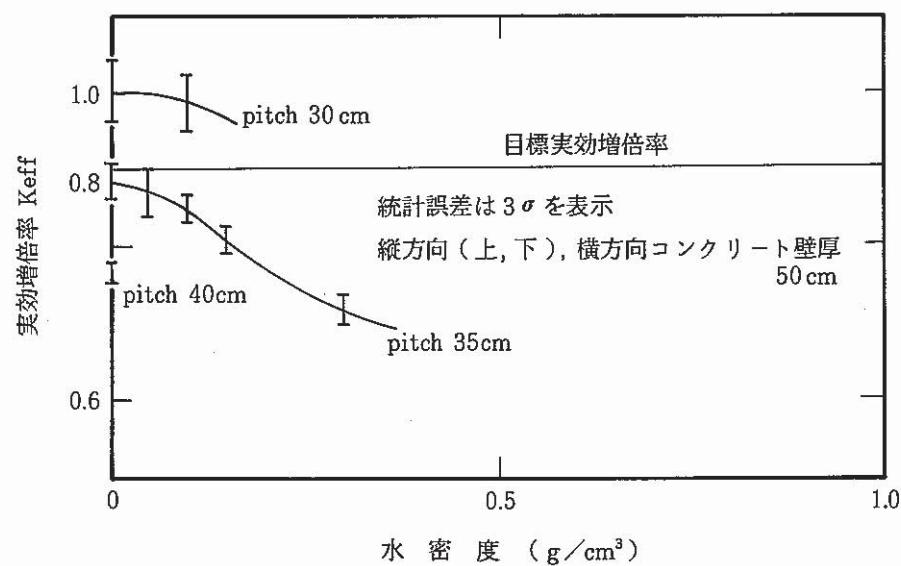


図 4.4-5 3次元解析による実効増倍率（保持筒内
ナトリウムポット EVS 方式）

表 4.4 - 1 燃料貯蔵臨界解析結果

| 貯蔵方式 | 雰囲気 | ピッチ cm | 縦方向(上, 下) 径方向壁 | Keff 1σ | 備 考 |
|-----------------------------|-----|-----------|-------------------|-------------------|-------------------------------|
| 保持筒内 ナトリウム ポット EVS | 空 気 | 35 | コンクリート 50 cm | 0.8844 ± 0.0078 | 3 σ を考えても Keff = 0.908 |
| | " | " | コンクリート 100 cm | 0.8781 ± 0.0052 | |
| | " | " | 炭 素 鋼 50 cm | 0.8869 ± 0.0069 | |
| Arガスセル 内ナトリウム ポット EVS | Ar | 35 | コンクリート 50 cm | 0.8702 ± 0.0080 | 3 σ を考えても Keff = 0.894 |

4.4.3 ナトリウムポット EVS 方式の遮蔽構成検討

ナトリウムポット EVS 方式貯蔵設備における、燃料貯蔵 Ar ガスセルおよび隣接周辺区域の線量率を制限値以下とするための遮蔽構成を検討する。

(1) 検討方法

Ar ガスセル壁厚及び材質をパラメータとして、Ar ガスセル及び隣接周辺区域の線量率を計算する。

(2) 検討条件

(i) 設備条件

(a) 燃料集合体線源強度

・炉停止 1 週間後の内側燃料集合体の線源強度を用いる。

・集合体 1 体あたりの線源強度（付～2 参照）

直接ガンマ線（FP および Actinide） : $1.71 \times 10^{17} \gamma/\text{sec}^*$

中性子（自発核分裂および α, n 反応） : $2.05 \times 10^8 n/\text{sec}$

* 構造材の放射化ガンマ線は線量率に 0.3 %程度しか寄与しないため、これを無視した。

この時の中性子線強度は、内側燃料より外側燃料の方が 13% 高いが、ガンマ線源強度は内側燃料が 9% 高くなっている。隣接周辺区域に対する遮蔽壁としてコンクリートを用いた場合は、直接ガンマ線が透過線量を支配していることから、内側燃料の線源強度を採用した。

(b) 遮蔽材

・周辺側壁 : 普通コンクリート。代替材として重コンクリート及び炭素鋼も評価

・Ar ガスセル天井壁 : 普通コンクリート。代替材として重コンクリートも評価

・Ar ガスセル床 : 炭素鋼 10cm または 20cm

（保持筒内ナトリウムポット EVS 方式のみ）

(ii) 目標線量率

設計線量率に安全ファクタとして $1/3$ を考慮する。

燃料貯蔵時

壁外面

常時立入る場所 $0.625 \text{ mrem}/\text{hr} \times 1/3$

週 48 時間以内立入る場所 $1.0 \text{ mrem}/\text{hr} \times 1/3$

週 10 時間以内立入る場所 $6.0 \text{ mrem}/\text{hr} \times 1/3$

燃料取扱時

壁外面 $200 \text{ mrem}/\text{hr} \times 1/3$

壁面より 1 m

10 mrem/hr × $\frac{1}{3}$

(3) 検討結果

(i) 線量率の計算

線量率の減衰分布（計算値）の代表例を図 4.4-6 及び図 4.4-7 に示す（付-9 参照）。

(ii) 必要遮蔽厚の計算

必要遮蔽厚の計算にあたっては、線量率計算値に対し、ファクター 6 の設計余裕を考慮し、これを線量率設計値とする。設計余裕の内訳は 4.3.3(3)-(ii) に示したとおりである。

また、燃料貯蔵セルの実効増倍率を K_{eff} とすると、ファクター $1/(1-K_{eff})$ だけ中性子線源強度が増加する。4.4.2 の解析に従うと集合体配列ピッチが 40cm の場合

$$K_{eff} = 0.7644 \pm 0.0041$$

が得られる。これは、保持筒内ナトリウムポット EVS 方式の増倍率であるが、Ar ガスセル内貯蔵方式ではこれより幾分小さくなると予想される。従って両方式について上記 K_{eff} に 3σ を考慮した値、 $K_{eff} = 0.7767$ を適用するものとすれば、次のファクターが得られる。

$$\text{増倍ファクター } \frac{1}{1-K_{eff}} = 4.5$$

遮蔽体がコンクリート以外の場合にも暫定的にこのファクターを適用した。

(a) 側壁遮蔽必要厚

普通コンクリートにおける側壁厚と透過線量率との相関を図 4.4-8 に示す。

各遮蔽体構成において目標線量率を満足する最小必要厚を表 4.4-2 にまとめた。

普通コンクリートでは、直接 γ 線源が強いため、中性子に比べて γ 線の透過線量率が支配的となっている。このため γ 線の遮蔽効果が大きい炭素鋼を併用すると、全体壁厚を削減することができる。20cm の炭素鋼では約 30~40cm の削減がもたらされる。さらに全体を重コンクリートとした場合には、普通コンクリートより 50cm 前後の壁厚削減となる。

普通コンクリート壁においては、燃料集合体の配列ピッチが 40cm 近傍では、必要遮蔽厚はほぼ一定であることが確認された。

(b) Ar ガスセル天井壁遮蔽必要厚

① Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式

本方式では燃料取扱時は燃料貯蔵時と基本的には変らず、設計線量率は燃料貯蔵時の壁表面のものをそのまま燃料取扱時に適用しても過剰遮蔽にはならない。実際の解析では燃料集合体の上端に接して天井壁を設けていることから（付-8 参照），この解析結果から燃料貯蔵時壁面の設計線量率を満足する壁厚を設定しておけば、燃料取扱時にも保守的な結果をもたらす。

各遮蔽構成における必要遮蔽厚を表 4.4-3 にまとめた。

重コンクリートは普通コンクリートに比べ60cm前後(約 $\frac{1}{3}$)の壁厚削減がもたらされている。

表 4.4-2 貯蔵設備側壁必要遮蔽厚

| 設計線量率* | | 0.625 mrem/hr | | | 1.0 mrem/hr | | | 6.0 mrem/hr | | |
|-----------------------|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 遮蔽体構成 | | OC | CS20cm + OC | HC | OC | CS 20cm + OC | HC | OC | CS20cm + OC | HC |
| 必要厚(増倍効果未考慮) cm | | 237 | 190 | 169 | 232 | 184 | 164 | 214 | 167 | 147 |
| 線量率計算値 mrem/ hr | 直接ガンマ線 | 3.20×10^{-2} | 2.21×10^{-2} | 4.5×10^{-3} | 5.31×10^{-2} | 4.16×10^{-2} | 7.7×10^{-3} | 3.14×10^{-1} | 2.80×10^{-1} | 1.02×10^{-1} |
| | 中性子 | 1.6×10^{-3} | 3.8×10^{-4} | 1.03×10^{-2} | 9.9×10^{-5} | 6.3×10^{-4} | 1.54×10^{-2} | 4.4×10^{-4} | 6.6×10^{-3} | 1.11×10^{-1} |
| | 2次ガンマ線 | 2.9×10^{-4} | 8.2×10^{-3} | 1.91×10^{-2} | 4.9×10^{-4} | 1.15×10^{-2} | 3.18×10^{-2} | 1.5×10^{-3} | 4.0×10^{-2} | 1.05×10^{-1} |
| | 総計 | 3.4×10^{-2} | 3.1×10^{-2} | 3.4×10^{-2} | 5.4×10^{-2} | 5.4×10^{-2} | 5.5×10^{-2} | 3.2×10^{-1} | 3.3×10^{-1} | 3.2×10^{-1} |
| 必要厚(増倍効果考慮済) cm | | 237 | 208 | 191 | 232 | 190 | 185 | 214 | 172 | 162 |

* 計算目標線量率

$$= \text{設計線量率} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{6}$$

OC : 普通コンクリート (Ordinary Concrete)

HC : 重コンクリート (Heavy Concrete)

CS : 炭素鋼 (Carbon Steel)

表 4.4-3 Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式での天井壁必要遮蔽厚

| 設 計 線 量 率 | | 0.625 mrem/hr | | 1.0 mrem/hr | | 6.0 mrem/hr | |
|---|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 遮 蔽 体 構 成 | | O C | H C | O C | H C | O C | H C |
| 必要厚(増倍効果未考慮) cm | | 180 | 116 | 175 | 114 | 156 | 101 |
| 線 量 率 計 算 値 mrem/hr | 直接ガンマ線 | 3.01×10^{-2} | 3.28×10^{-2} | 4.90×10^{-2} | 5.15×10^{-2} | 2.98×10^{-1} | 3.08×10^{-1} |
| | 中 性 子 | 2.5×10^{-4} | 2.9×10^{-4} | 3.9×10^{-4} | 4.1×10^{-4} | 1.9×10^{-3} | 1.6×10^{-3} |
| | 2次ガンマ線 | 3.0×10^{-3} | 1.6×10^{-3} | 4.0×10^{-3} | 2.2×10^{-3} | 1.2×10^{-2} | 6.7×10^{-3} |
| | 総 計 | 3.3×10^{-2} | 3.5×10^{-2} | 5.3×10^{-2} | 5.4×10^{-2} | 3.1×10^{-1} | 3.2×10^{-1} |
| 必要厚(増倍効果考慮済) cm | | 183 | 118 | 178 | 115 | 158 | 102 |

OC : 普通コンクリート

HC : 重コンクリート

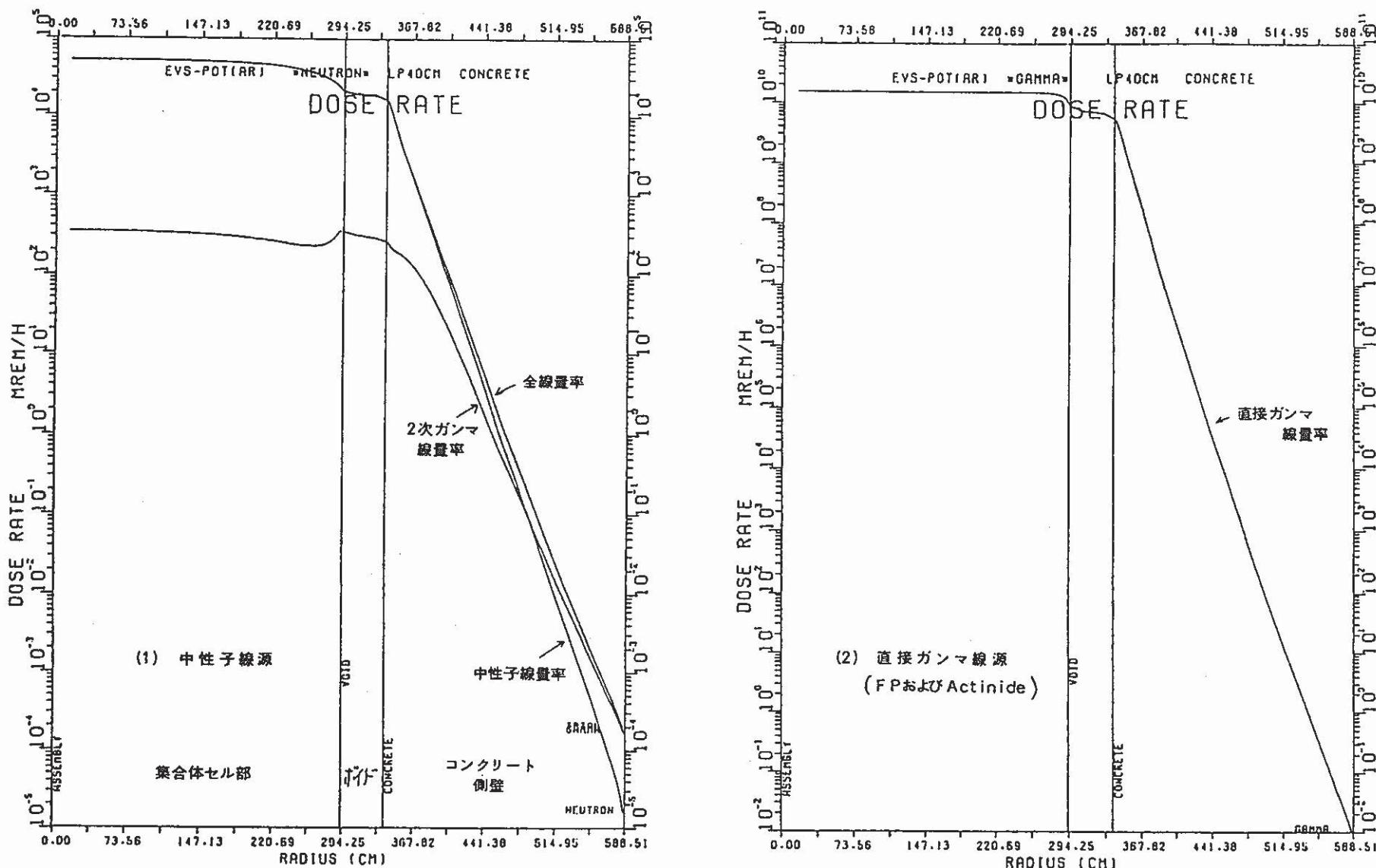


図 4.4-6 径方向線量率分布（計算値）……コンクリート側壁

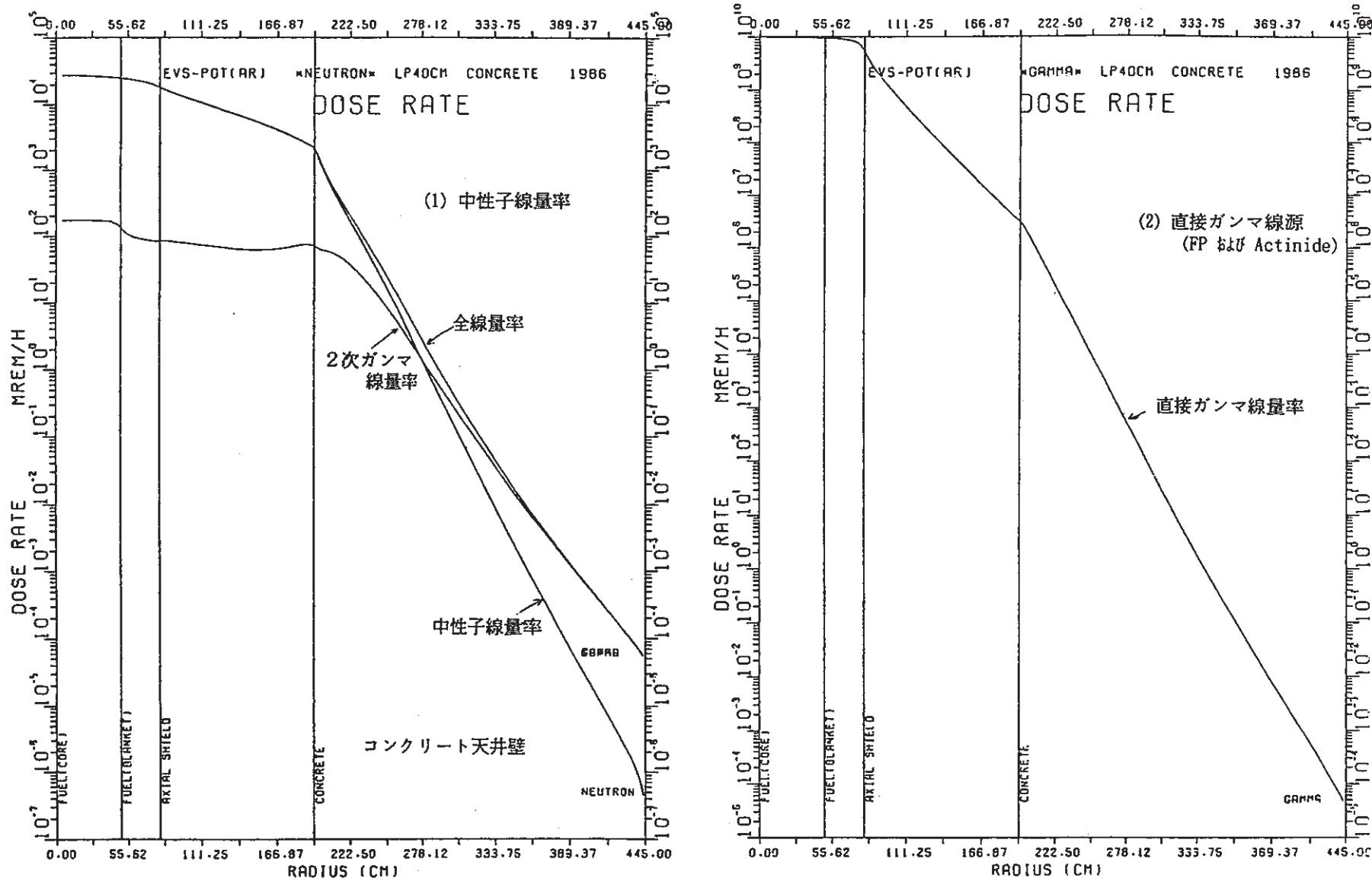


図 4.4-7 (1/2) 軸方向線量率分布(計算値)……コンクリート天井壁(Arガスセル内ナトリウムポットEVS方式)

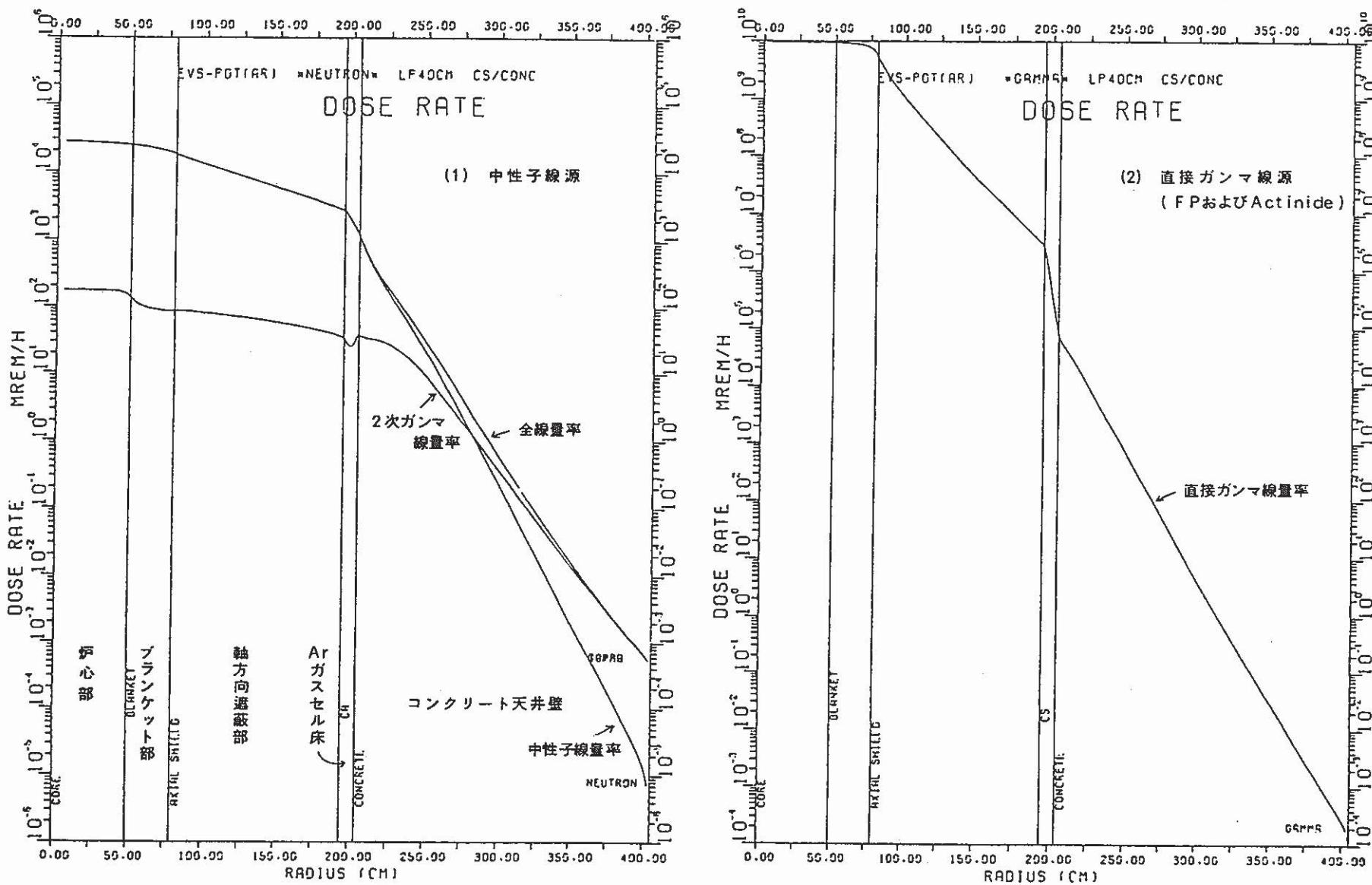


図 4.4-7 (2/2) 軸方向線量率分布(計算値)……コンクリート天井壁(保持筒内ナトリウムポット EVS 方式)

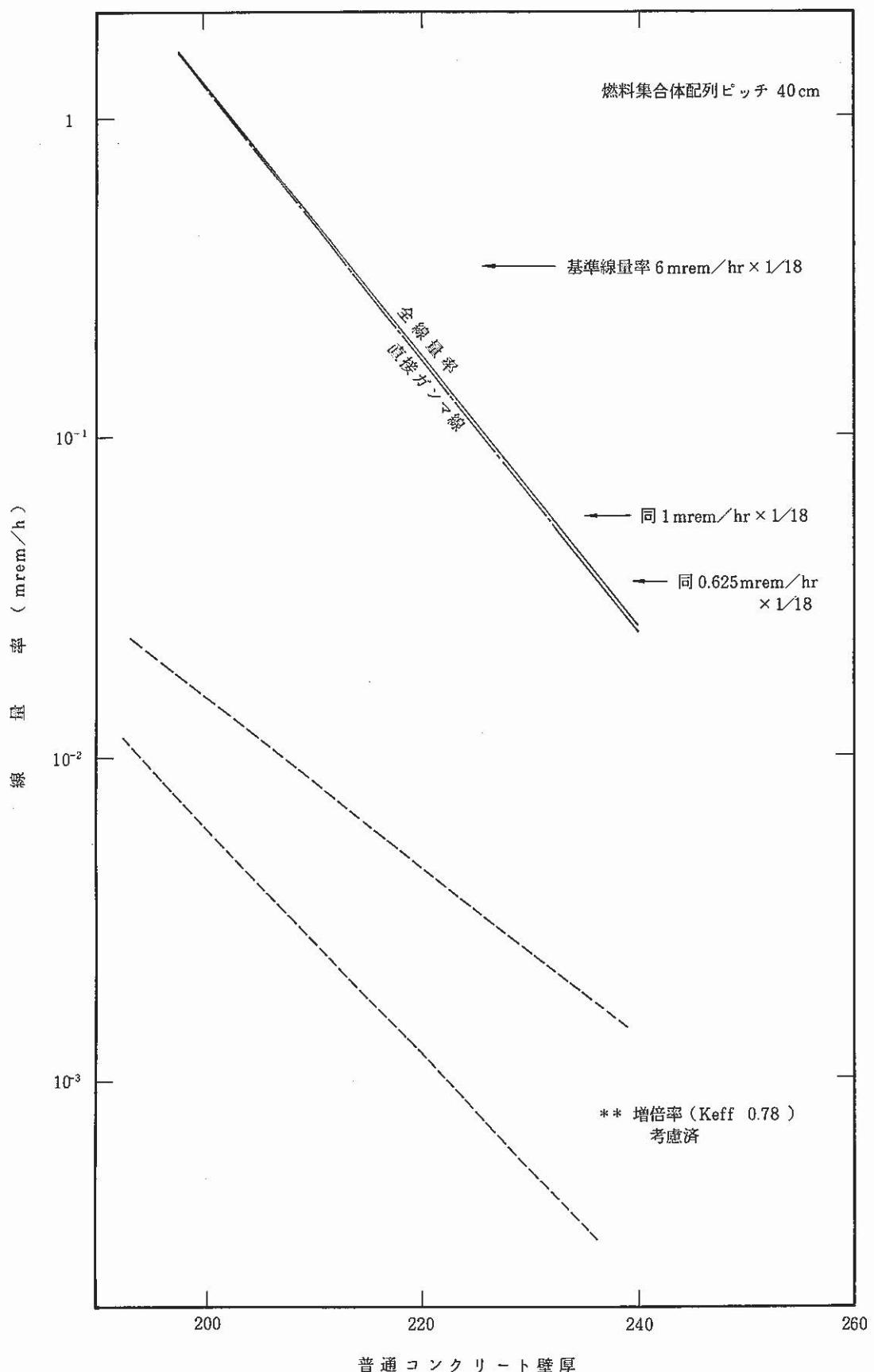


図 4.4-8 側壁コンクリート厚と透過線量率

② 保持筒内ナトリウムポット EVS 方式

天井壁厚と透過線量率との相関を図 4.4-19 に示した。この図より求めた各条件下での必要遮蔽厚を表 4.4-4 にまとめた。

燃料取扱時には、Ar ガスセル内の取扱中燃料集合体 1 体からの直接 γ 線が天井壁透過線量率を支配する。重コンクリートを用いた場合の必要壁厚は、燃料取扱時の移送線源に対する線量率基準により規定される (113 cm)。これに対し普通コンクリートを用いた場合の必要壁厚は、燃料貯蔵時に適用する設計線量率および Ar ガスセル床炭素鋼厚によって変化するが、151 cm 以上の壁厚が必要となる。

以上は、炉停止 1 週間後の燃料集合体貯蔵について解析評価を行って来たが、集合体取出し時期を 21 日目に遅らせた場合の普通コンクリートの必要壁厚は以下の削減が予想される。

側 壁 : 約 7 cm 削減

天井壁 : 約 7 cm 削減

ただし保持筒内ナトリウムポット EVS 方式では、通常時（燃料貯蔵時の設計線量率で天井壁が規定されている場合）は、1 cm 以下の削減となる。

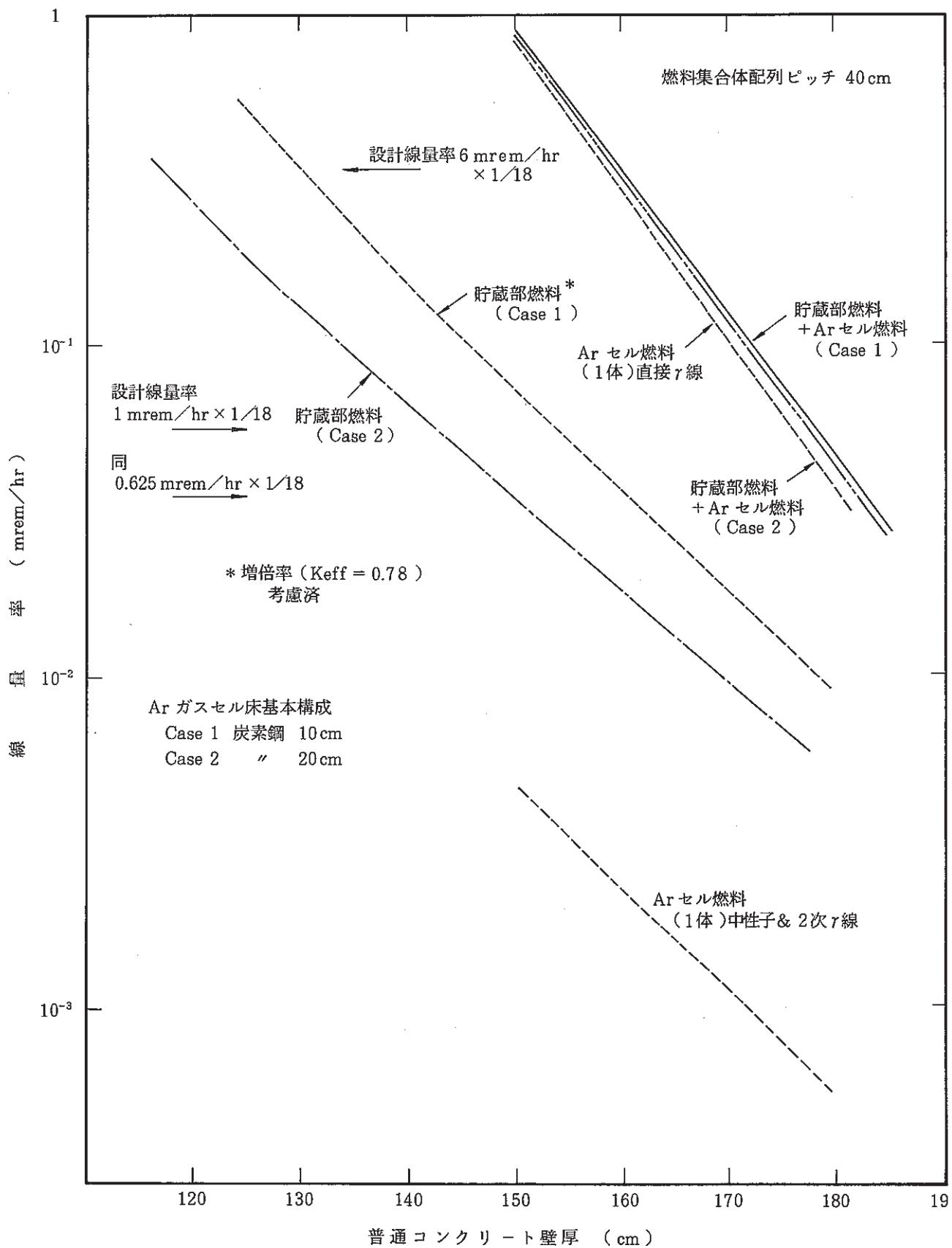


図 4.4-9 (1/2) 天井コンクリート厚と透過線量率(普通コンクリート)
(保持筒内ナトリウムポット EVS 方式)

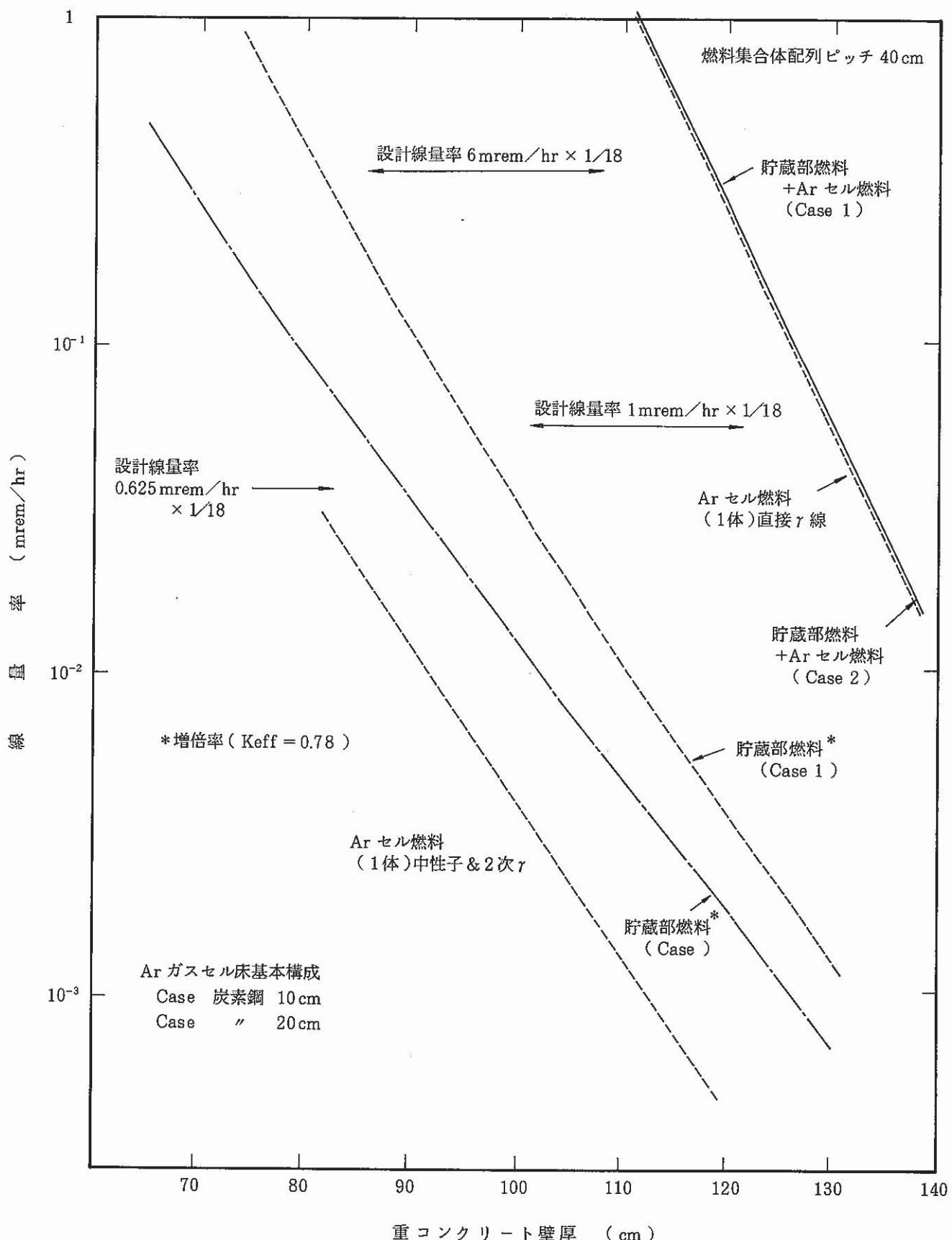


図 4.4-9 (2/2) 天井コンクリート厚と透過線量率(重コンクリート)
(保持筒内ナトリウムポット EVS 方式)

表 4.4 - 4 保持筒内ナトリウムポット EVS 方式での天井壁必要遮蔽厚

単位 cm

| 状態 Ar ガスセル 天井壁遮蔽体 | 設計線量率 ガスセル 床 基本構成 | 燃料貯蔵時 | | | 燃料取扱時 表面 200 mrem/hr 表面より 1 m 外 10 mrem/hr |
|-------------------------|----------------------------|---------------------|-------------------|-----------------|---|
| | | 表面 0.625 mrem/hr | 表面 1.0 mrem/hr | 表面 6 mrem/hr | |
| 普通コンクリート | 炭素鋼10cm | 161 | 154 | 131 | 151 |
| | 炭素鋼20cm | 150 | 143 | 118 | 151 |
| 重コンクリート | 炭素鋼10cm | 100 | 96 | 82 | 113 |
| | 炭素鋼20cm | 90 | 85 | 68 | 113 |

4.4.4 ナトリウムポット EVS 方式の除熱性評価

Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式と保持筒内ナトリウムポット EVS 方式を対象とし、各々に対して自然通風、強制通風の両冷却方式による除熱性を評価する。

(1) 評価方法

ポット内に貯蔵している使用済燃料の発熱率に対する燃料被覆管最高温度を計算する(付-10)。

(2) 評価条件

(i) ポット内貯蔵使用済燃料の発熱率 : 3 ~ 32 kW

(ii) 温度条件

(a) Ar ガスセル内貯蔵方式

セル内雰囲気温度 : 55 °C

(b) 保持筒内貯蔵方式

貯蔵部入口空気温度 : 32 °C

(c) 燃料被覆管制限温度

通常時および異常な過渡変化時 : 550 °C

事故時 : 675 °C

(iii) 冷却ガス流量

(a) Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式

Ar ガス自然循環

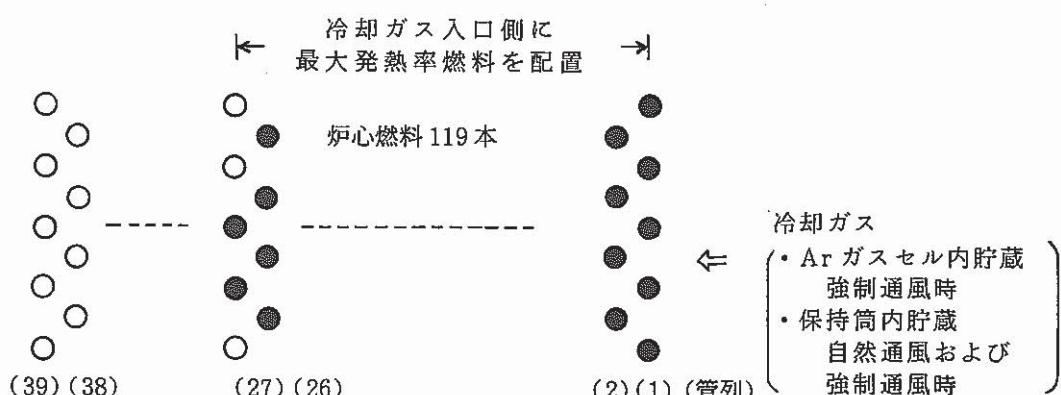
Ar ガス強制循環 $2 \times 10^5 \sim 8 \times 10^5 \text{ kg/h}$

(b) 保持筒内ナトリウムポット EVS 方式

空気自然通風

空気強制通風 $2 \times 10^5 \sim 8 \times 10^5 \text{ kg/h}$

(iv) 燃料の貯蔵部内配置



除熱性の評価において、貯蔵設備全体に収納された燃料の総発熱率 Q_{TOTAL} と燃料1体当

りの最高発熱率 Q_{MAX} の関係は以下のように仮定した。

$$Q_{TOTAL} = Q_{MAX} \times N_c + Q_{BL} \times N_b \quad [kW]$$

$$\left. \begin{array}{l} Q_{BL} : \text{内側炉心燃料の発熱率が } Q_{MAX} \text{ となる同時期における} \\ \text{ ブランケット燃料の発熱率 (1体あたり) } [kW] \\ N_c : \text{炉心燃料の貯蔵体数} = 119 \text{ 体} \\ N_b : \text{ブランケット燃料の貯蔵体数} = 38 \text{ 体} \end{array} \right\}$$

具体的な数値は以下とした。

| Q_{MAX} | 3 kW | 5 kW | 10 kW | 20 kW | 32 kW |
|-------------|--------|--------|----------|----------|----------|
| Q_{TOTAL} | 376 kW | 627 kW | 1,247 kW | 2,497 kW | 4,013 kW |

(V) その他

保持筒内貯蔵方式で自然通風時の風量評価（付-11）において空気通風路の条件は以下のように設定した。

- (a) 空気通風路の構成 : 図 4.4-10
- (b) 空気取入口のフィルタ : 配置の有無
(フィルタを設置する場合は流動抵抗を30 mmAq に設定する)
- (c) ダクトの屈曲回数 : 10
(ダクトストリーシング評価から求めた必要ベント数(付-12参照))
- (d) 空気出口スタック高さ : 40m, 60m

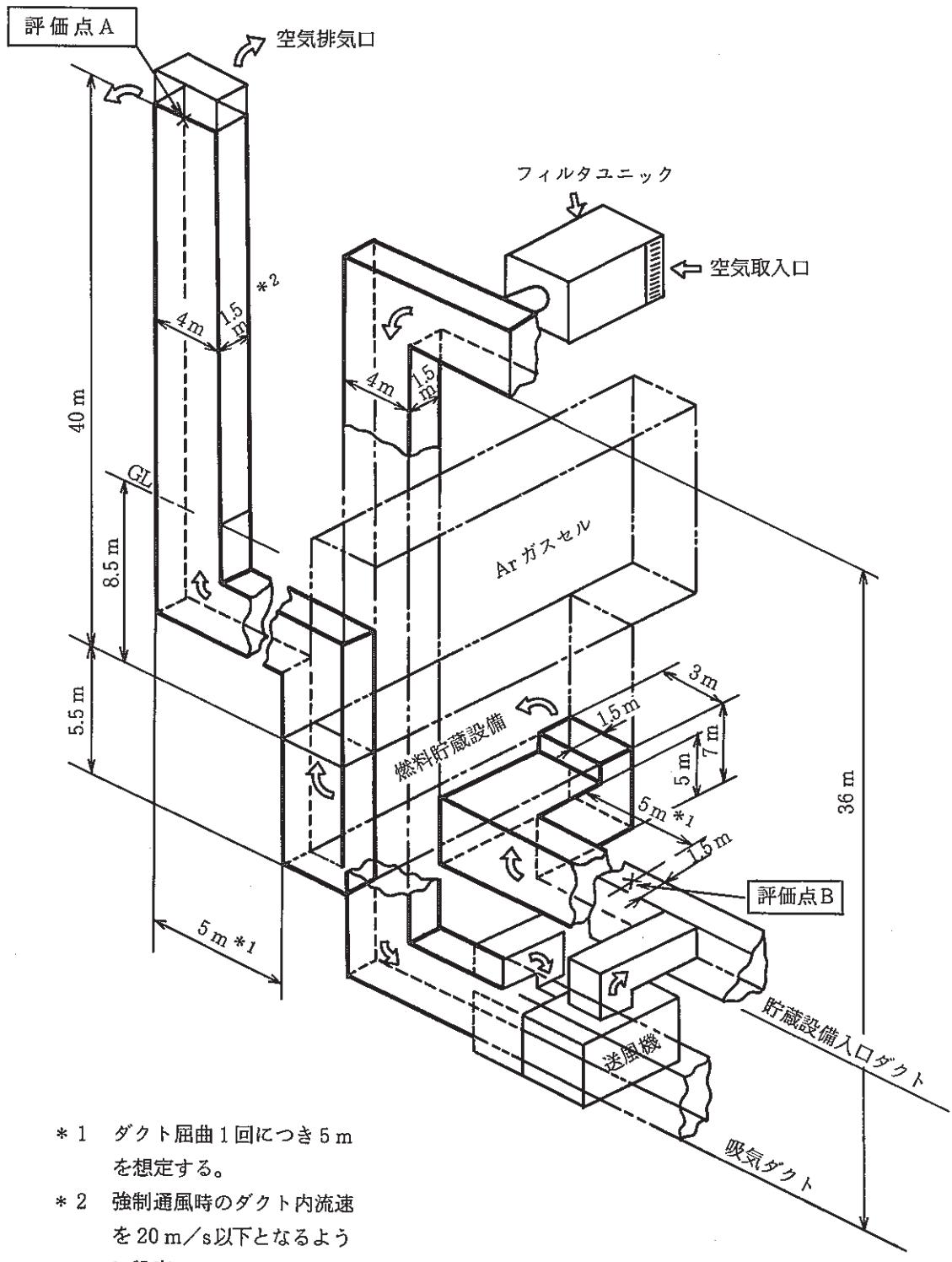


図4.4-10 吸排気ダクト構成概念図

(3) 評価結果

(i) Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式

貯蔵燃料 1 体あたりの発熱率と燃料被覆管温度の関係を図 4.4-11 に示す。

図より、通常時の燃料制限温度条件 (550 °C) を満足する発熱量は、自然通風時 5.5 kW / 体、風量 $3 \times 10^5 \text{ kg/h}$ の強制通風時 32 kW / 体であることがわかる。

なお、上記の結果は貯蔵設備内に収納された使用済燃料が発熱率一定のまま定常状態に至った場合の温度である。原子炉内ナトリウム (200 °C) 中より使用済燃料が取り出され、キャスク内に収納されるまでの移送経路では、ポット外面断熱という厳しい条件を想定しても、燃料被覆管の温度上昇は発熱率 32 kW においても約 130 °C であり (移送時間約 20 分、ポット内熱容量 70 kcal/°C *)、移送中に被覆管が 550 °C を越えることはない。 (* 付 - 7 参照)

(ii) 保持筒内ナトリウムポット EVS 方式

ポットと保持筒間の Ar ガスギャップの温度差が結果に有意な影響を及ぼすため、ポット外表面と保持筒内表面のふく射率 ϵ をパラメータとした。貯蔵燃料 1 体あたりの発熱率と燃料被覆管温度の関係を以下のように示す。

① $\epsilon = 0.5$ (ブラッククロム被覆相当) 図 4.4-12

② $\epsilon = 0.8$ 図 4.4-13

③ $\epsilon = 0.15$ (ステンレス鋼表面被覆無しに相当) 図 4.4-14

なお上記の結果は(i)と同様、貯蔵施設内に収納された使用済燃料が発熱率一定のまま定常状態に至った場合の温度である。

原子炉ナトリウム中から貯蔵設備までにおける燃料被覆管温度上昇は、(i)と同様に約 130 °C であり移送中に被覆管が 550 °C を越えることはない。

ポット外表面と保持筒内表面の輻射率 ϵ については、現在の知見で採用し得る値として、 $\epsilon = 0.5$ を代表値とする (付 - 13 参照)。

そこで、 $\epsilon = 0.5$ とした場合、通常時の燃料被覆管温度制限条件を満足するための燃料発熱率、冷却空気流量、貯蔵部出口空気温度を表 4.4-5 に示す。

また、 $\epsilon = 0.5$ 、フィルタ有り、ダクトベント数 10、スタック高さ = 60 m について、貯蔵燃料 1 体あたりの最高発熱率と各部 (燃料被覆管、燃料ポット、保持筒、保持筒周囲の空気) の最高温度との関係を以下に示す。

・自然通風時 図 4.4-15

・強制通風時 (風量 $4 \times 10^5 \text{ kg/h}$) 図 4.4-16

図 4.4-17 には代表例として、強制通風時、燃料発熱率 20 kW のケースでの各部軸方向温度分布を示す。

さらに自然通風時の除熱性に関して下記項目の影響を調べた。

- ・ダクトベント個数
- ・空気取入口フィルタ有無
- ・出口フィルタスタック高さ

結果を以下に示す。（ $\epsilon = 0.5$ として評価）

- ・ベント個数の影響（フィルタ無し、スタック高さ40m） 図4.4-18
- ・ “ ” （フィルタ有り、スタック高さ40m） 図4.4-19
- ・スタック高さの影響（ベルト個数10、フィルタ有り） 図4.4-20

スタック高さ40mでフィルタを設けない場合は図4.4-18より、ベント数が10の時、貯蔵燃料1体当たりの発熱率が12kW以下であれば自然通風による除熱が可能である。ベント数の影響は大きくなく、ベント数を0としても除熱できる燃料の最高発熱率は約15kW程度である。

スタック高さ40mでフィルタを設けた場合は図4.4-19より、自然通風が充分得られず、燃料被覆管温度を通常時の制限温度である550°C以下とすることは出来ず成立性が見通せない。

フィルタを設ける温度は、図4.4-20のようにスタック高さを60mとすれば1体当たりの発熱率が5kWの燃料の除熱が可能となる。

以上のようにフィルタ設置の有無が除熱性に与える影響は大きく、また、フィルタの目づまりによる除熱特性の変化も予想される。従ってシステム設計上はフィルタの設置が一つの大きな要目となることから、今後フィルタの必要性、最適なフィルタ仕様等を明らかにしていく必要がある。

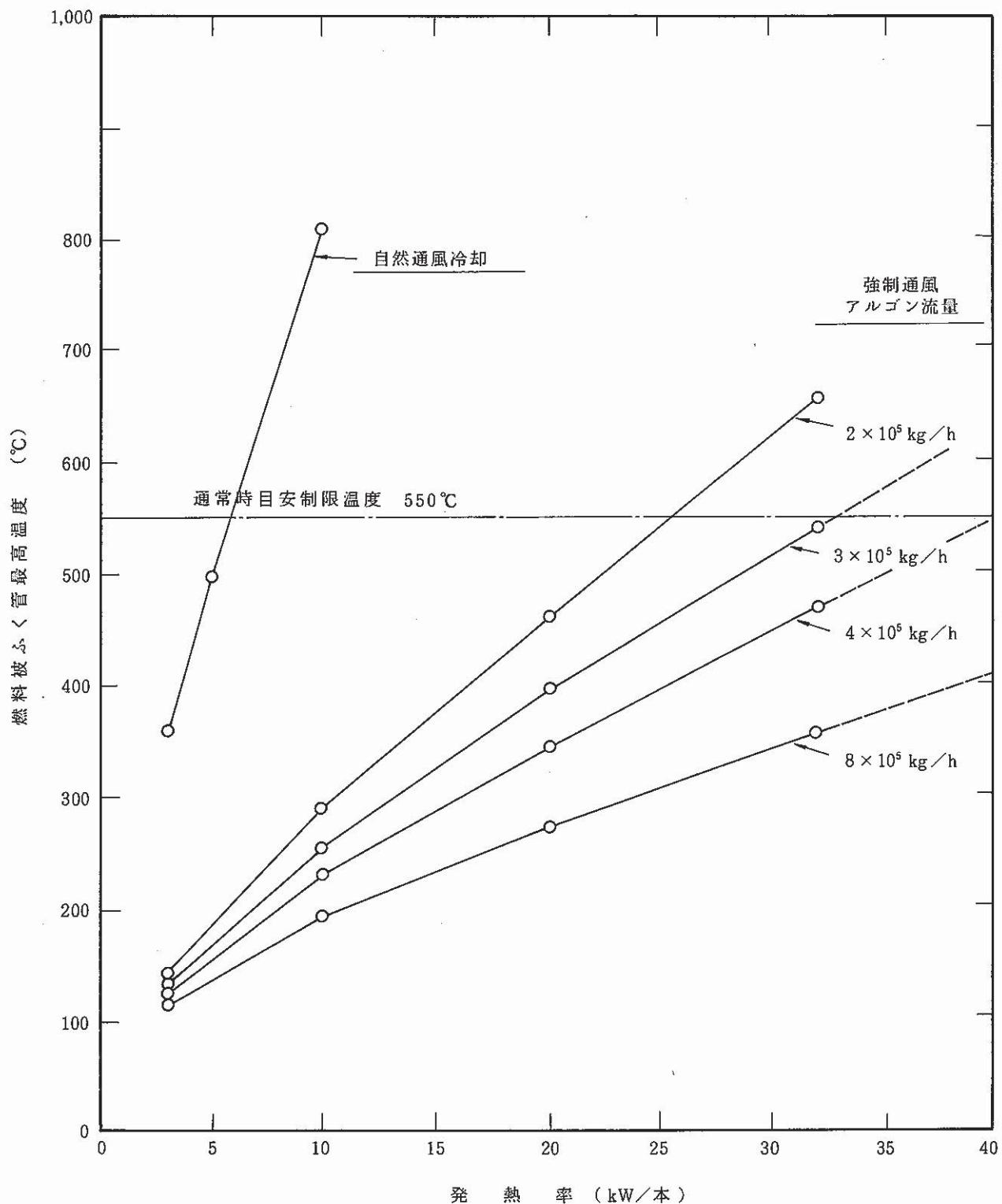
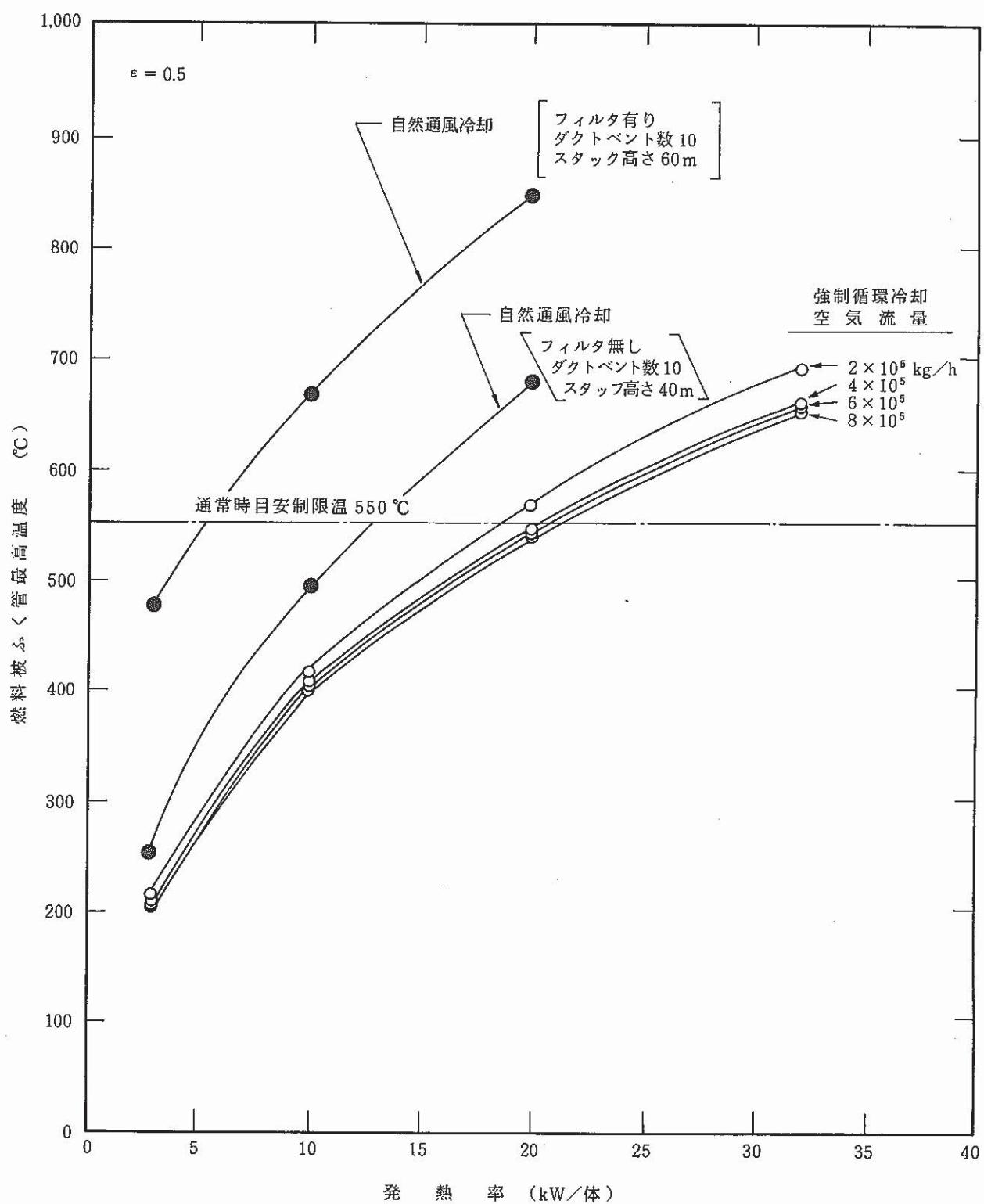
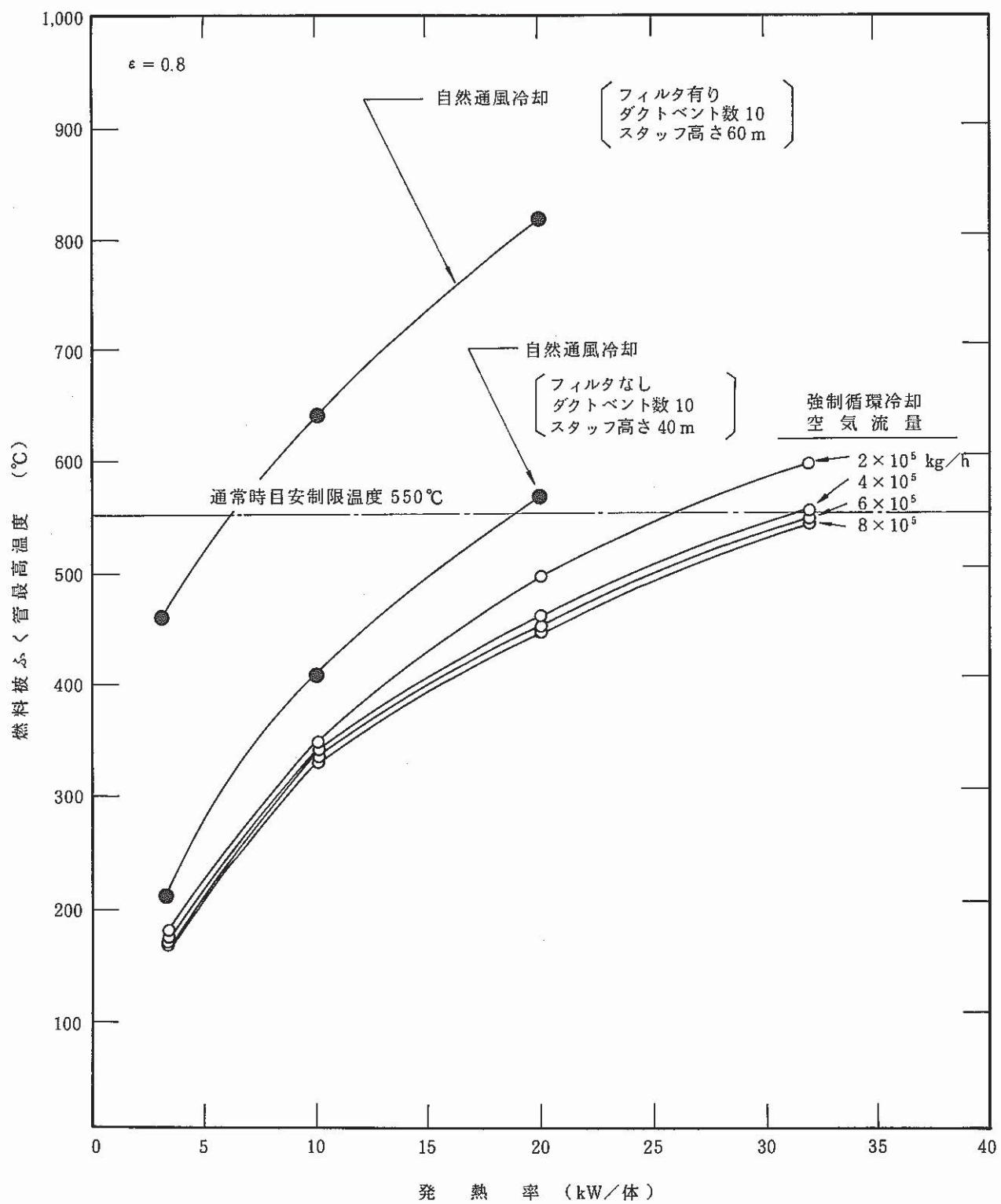


図 4.4-11 Ar ガスセル内貯蔵方式における燃料温度計算結果

図 4.4-12 保持筒内貯蔵方式における燃料温度計算結果 ($\varepsilon = 0.5$)

図 4.4-13 保持筒内貯蔵方式における燃料温度計算結果 ($\epsilon = 0.8$)

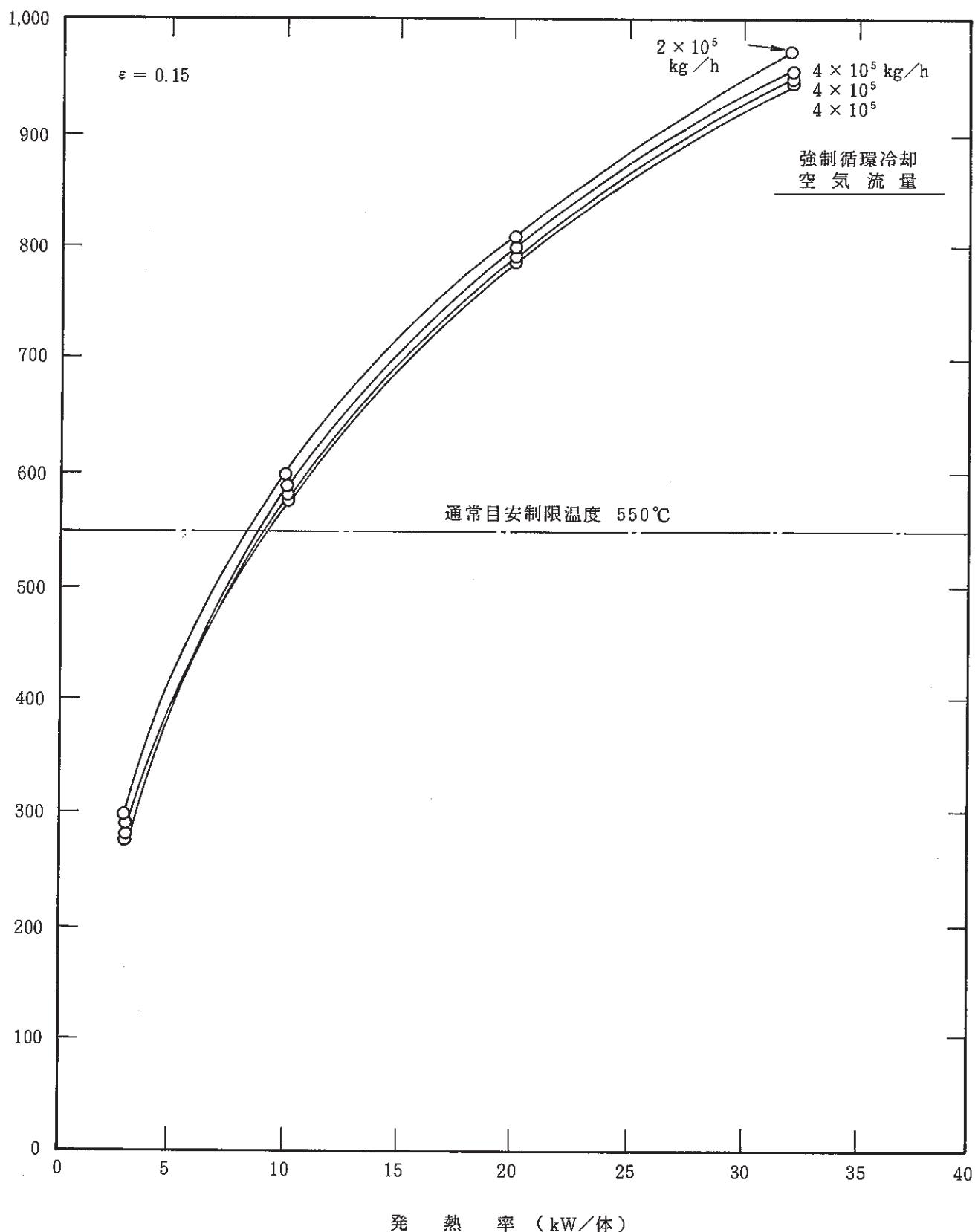
図 4.4-14 保持筒内貯蔵方式における燃料温度計算結果 ($\epsilon = 0.15$)

表 4.4 - 5 保持筒内貯蔵方式燃料貯蔵設備の燃料貯蔵条件

| 項 目 | | フ イ ル タ | |
|------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | 無 *1 | 有 *2 |
| 自然通風 | 貯蔵燃料 1 体あたりの最高発熱率 | 12 kW | 5 kW |
| | 冷却空気流量 | $5.6 \times 10^4 \text{ kg/h}$ | $1.0 \times 10^4 \text{ kg/h}$ |
| | 貯蔵部出口空気温度 | 127 °C | 270 °C |
| 強制通風 | 貯蔵燃料 1 体あたりの最高発熱率 | 20 kW | |
| | 冷却空気流量 | $4 \times 10^5 \text{ kg/h}$ | |
| | 貯蔵部出口空気温度 | 55 °C | |

* 1 ダクトベンド数=10, スタック高さ=40m

* 2 ダクトベンド数=10, スタック高さ=60m

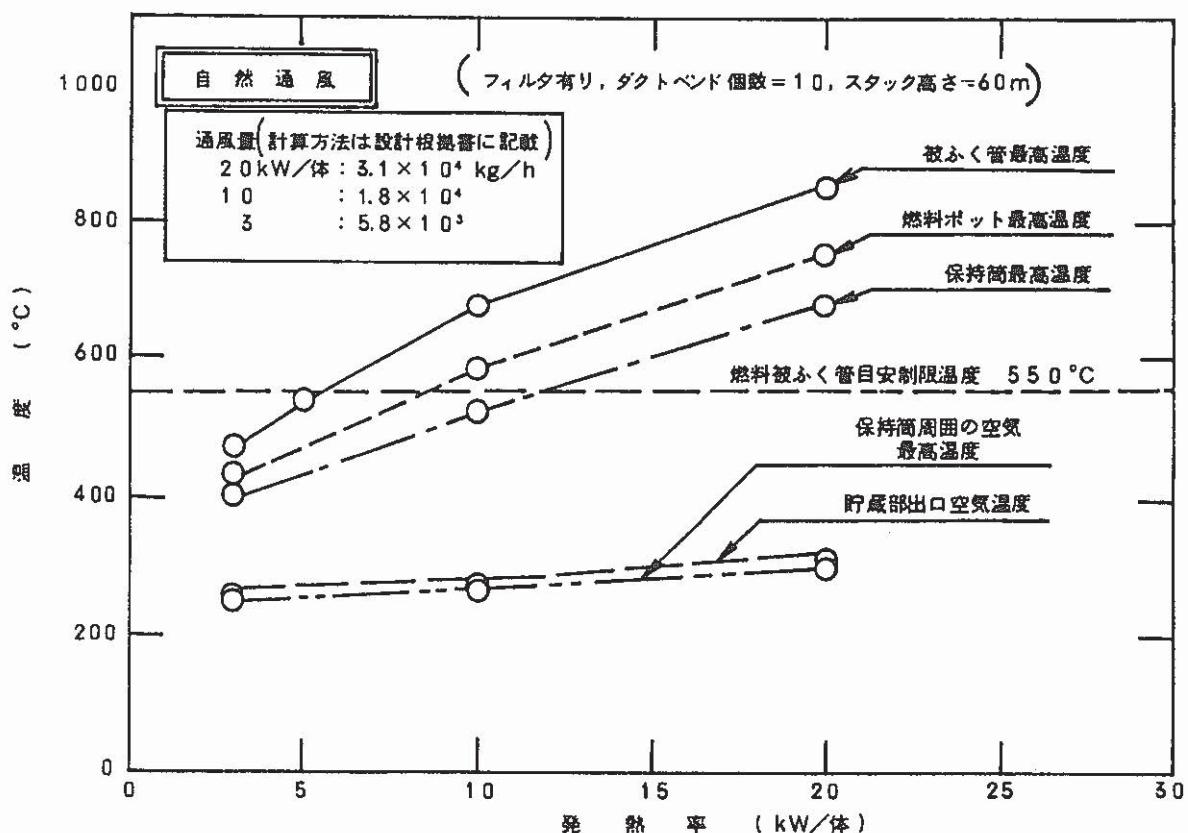


図 4.4-15 貯蔵燃料 1 体あたりの最高発熱率と各部の最高温度(自然通風)

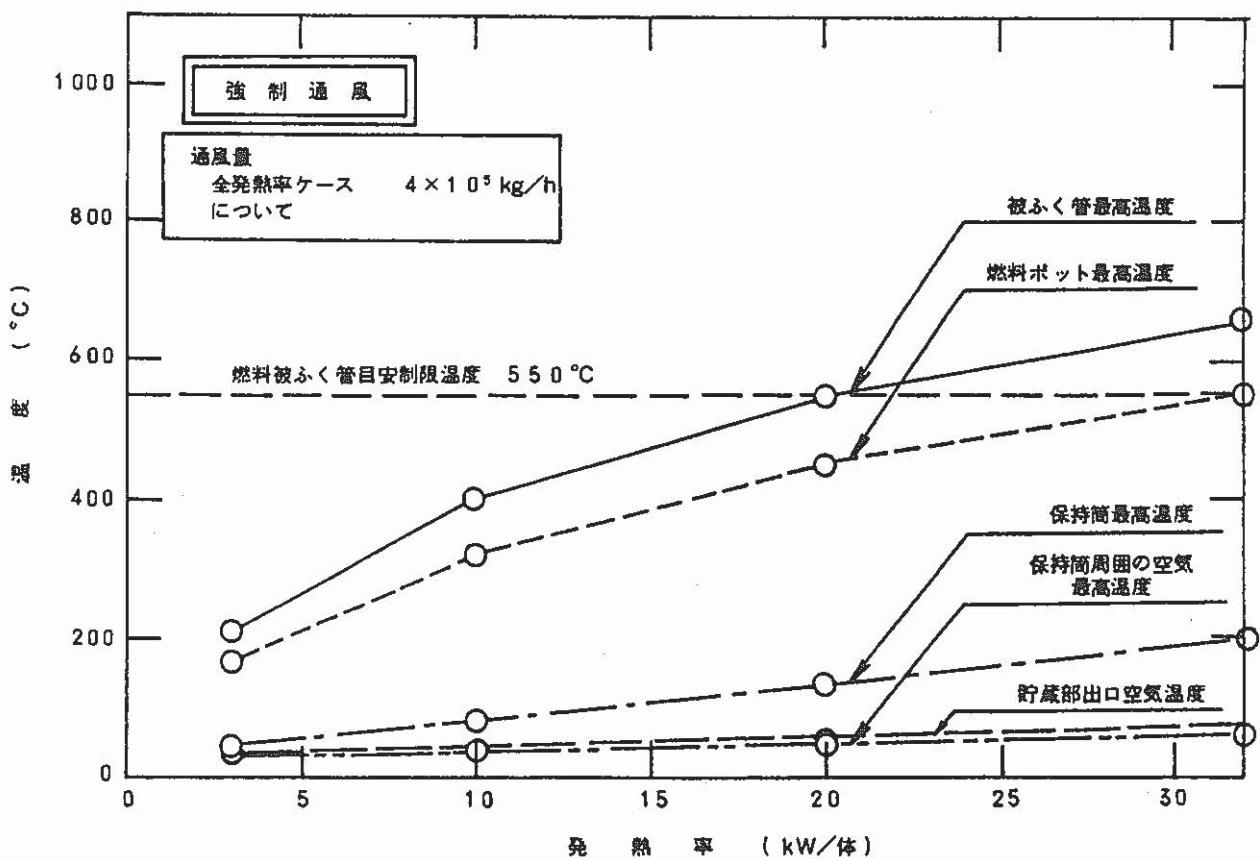


図 4.4-16 貯蔵燃料 1 体あたりの最高発熱率と各部の最高温度(強制通風)

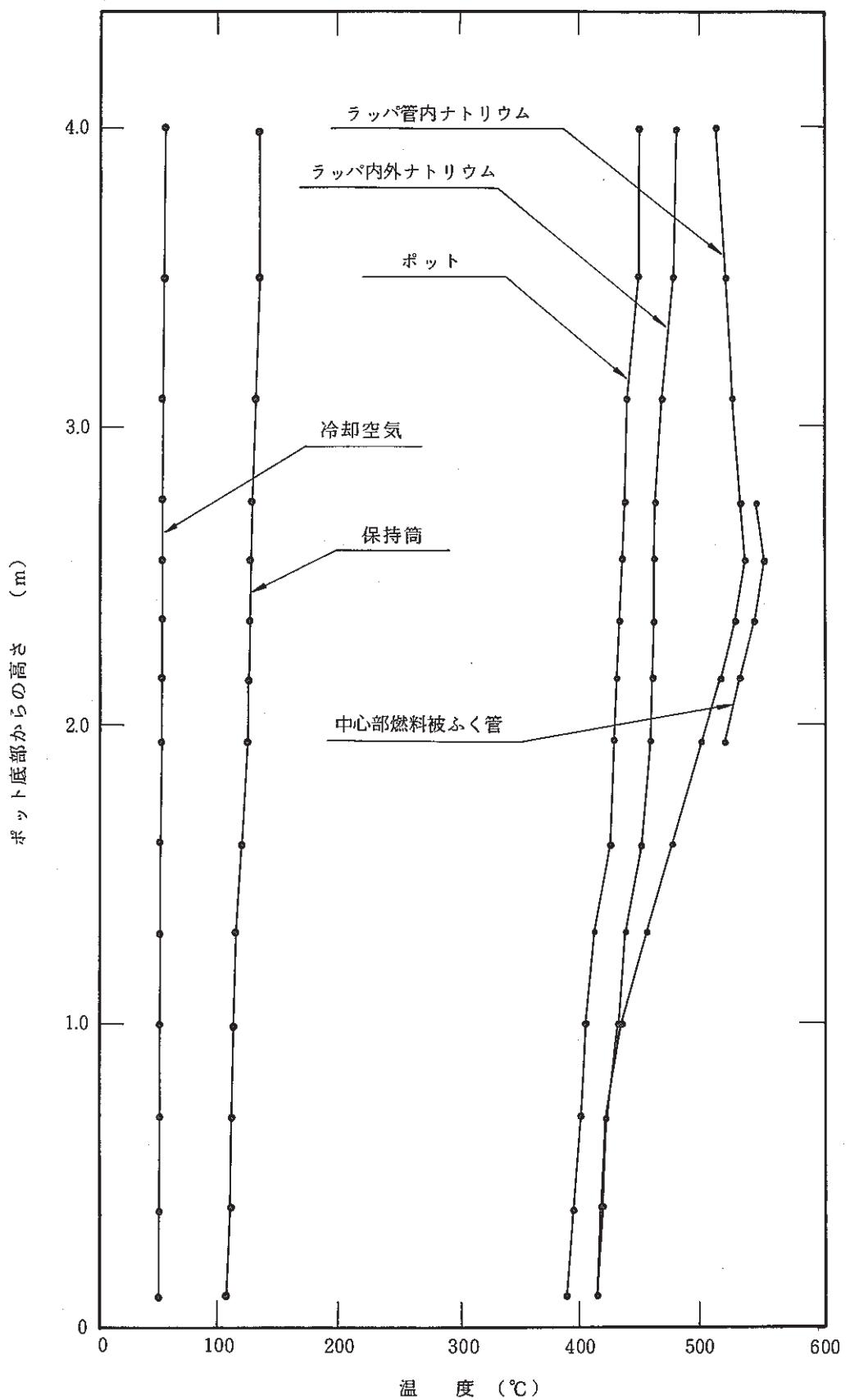
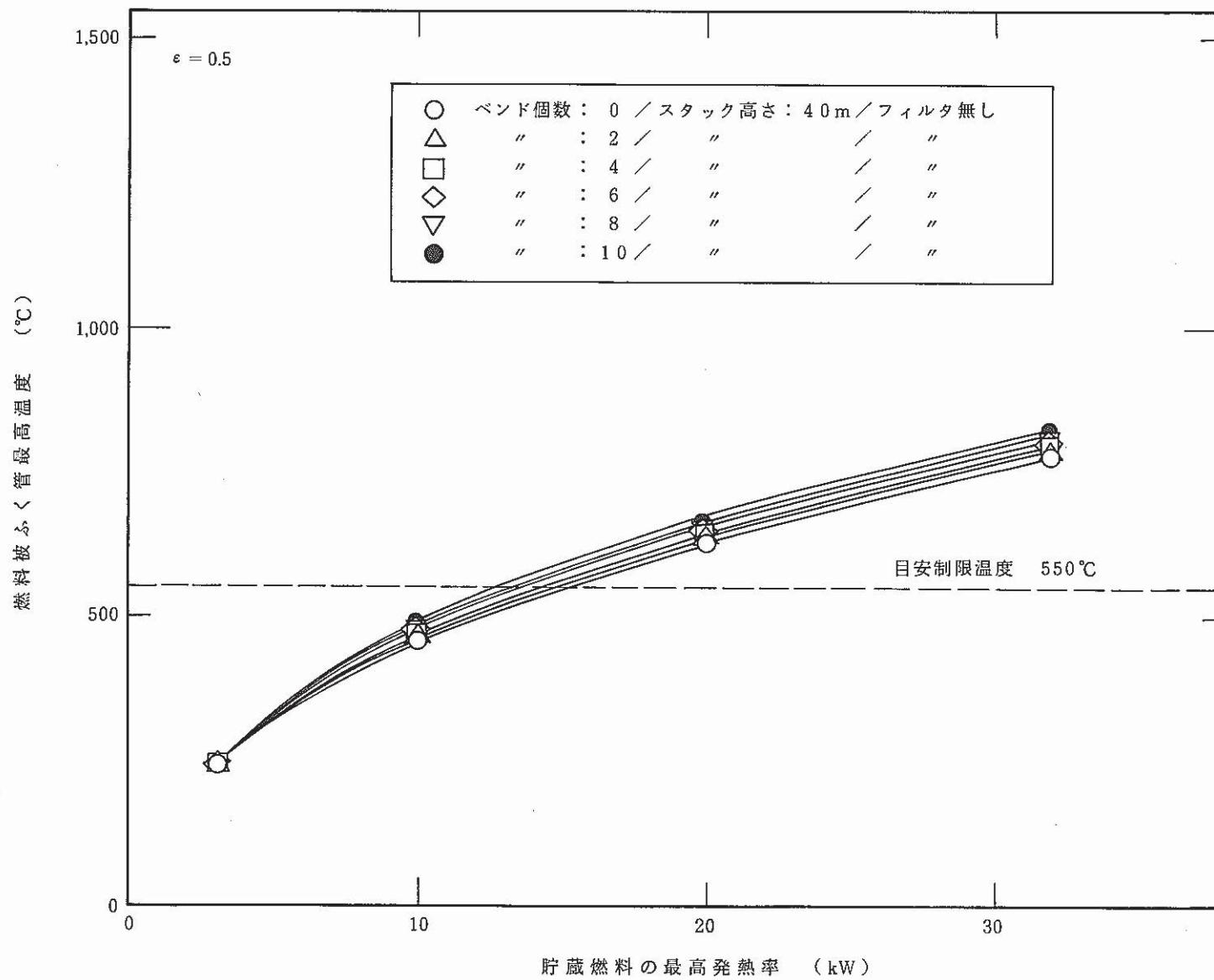
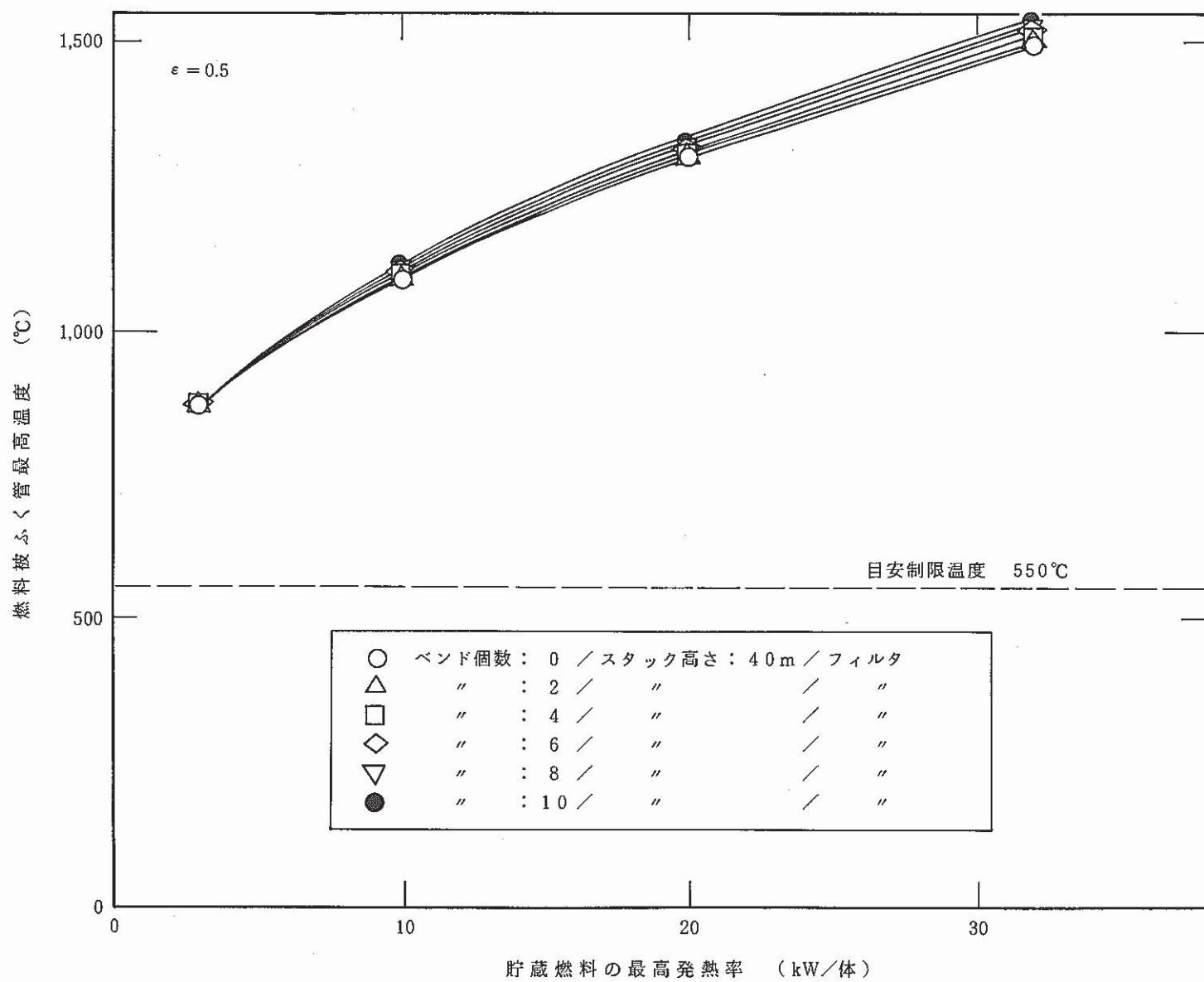
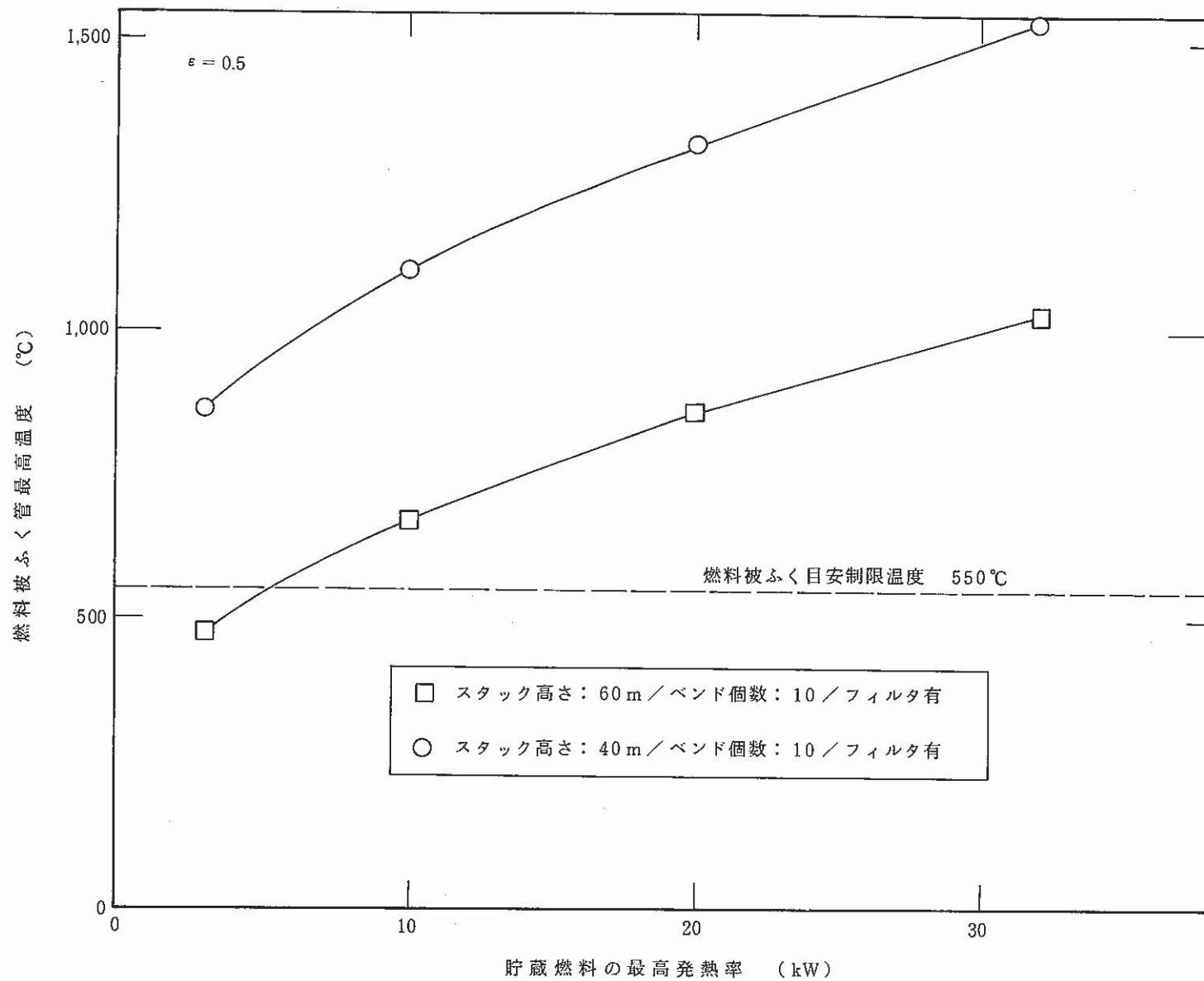


図 4.4-17 各部軸方向温度分布 (発熱率 20 kW, 風量 $4 \times 10^5 \text{ kg/h}$)

図 4.4-18 ダクトのベンド個数の影響 ($\epsilon = 0.5$, フィルタ無し, スタック高さ 40m)

図 4.4-19 ダクトのベンド個数の影響 ($\varepsilon = 0.5$, フィルタ有り, スタック高さ 40m)

図 4.4-20 スタック高さの効果 ($\varepsilon = 0.5$, フィルタ有り, ベンド個数 10)

4.4.5 ナトリウムポット EVS方式における異常事象解析

ナトリウムポット EVS方式に於ける異常事象に対して次の様な事象解析を行った。

- ① ポットからのナトリウム漏洩に関して、事象解析等による検討を行い、安全上の要求条件を導びく。
- ② 動力源の喪失としては、設計基準外ではあるが全電源喪失事故を想定して、強制通風復帰までの余裕時間を評価する。

(1) ポットナトリウム漏洩

(i) Arガスセル内貯蔵方式

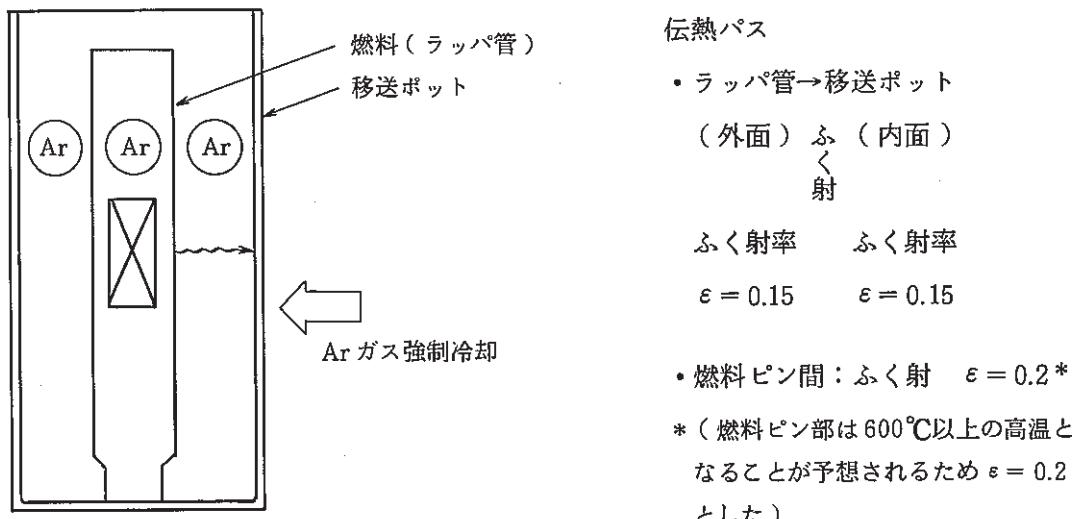
移送ポットが破損した場合、ナトリウム液位の低下に伴い、燃料発熱部がArガス中に露出する可能性があり、燃料の冷却が著しく困難となる。

ポット内のナトリウム液位を保存するための対策を施さない場合、予想される事象推移は図4.4-21(a)のようになる。

(a) 解析条件

- | | |
|---------------|------------------------------|
| ① ポット内燃料の発熱率 | 3 kW~32 kW |
| ② Arガスセル雰囲気温度 | 55 °C |
| ③ 冷却ガス風量 | $3 \times 10^5 \text{ kg/h}$ |
- (強制通風相当)

(b) 解析モデル



(c) 解析結果

図4.4-22に異常事象時の各部温度を示す。

これより、ポット内燃料の発熱が3 kWでも中心部のピンの被覆管温度は、事故時の制限温度675 °Cを越え、ポット内ナトリウム液位を保持するための対策を施さないと安全性は成立しないことがわかる。

(d) 安全上の要求条件

Arガスセル内貯蔵方式ではポットからのナトリウム漏洩時に、ポット内ナトリウム液位が燃料発熱部頂部レベルより上に保持されるように、ポットの外側に保持筒を設ける必要がある。

このような設備対応がとられた場合に予想される事象推移は、図4.4-21(b)のようになり、異常事象は安全に終止できる見通しである。

(ii) 保持筒内貯蔵方式

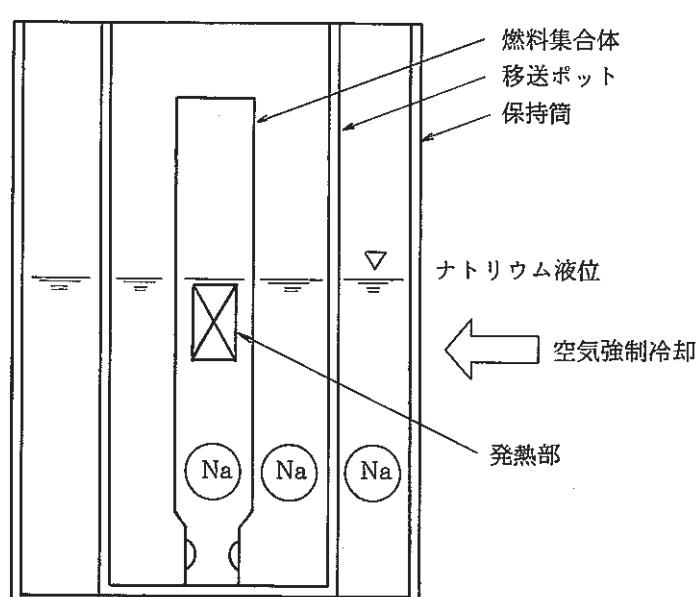
保持筒内貯蔵方式では、ポットからの漏洩ナトリウムは保持筒とポットの間隙部に貯留されるため、燃料発熱部頂部レベル以下にナトリウム液位が低下しないように保持筒の容積を制限することで、燃料発熱部のガス中への露出を避けることが出来る。

この条件が満足されたとして、予想される事象推移を図4.4-23に示す。

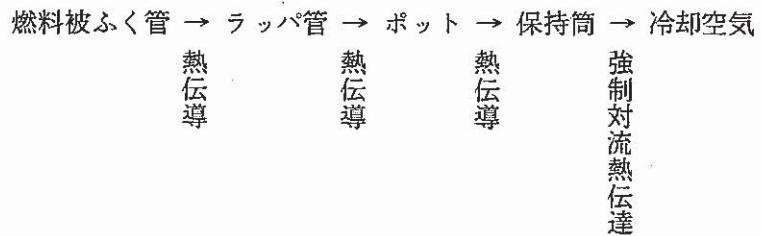
(a) 解析条件

- | | |
|---------------|------------------------------|
| ① ポット内燃料の発熱率 | 3 kW～32 kW |
| ② ポット内ナトリウム液位 | 燃料発熱部頂部レベル |
| ③ 貯蔵部入口空気温度 | 32°C |
| ④ 冷却空気風量 | $4 \times 10^5 \text{ kg/h}$ |
- (強制通風相当)

(b) 解析モデル



伝熱パス



(c) 解析結果

燃料の発熱率と燃料被ふく管最高温度の関係は図 4.4-24 のようになり、被ふく管最高温度が事故時の制限温度 675°C 以下に収まるための燃料発熱率は最大 25 kW である。

(d) 安全上の要求条件

以上より、安全上の要求条件としては以下の 2 点が挙げられる。

① 保持筒の内容積

ポットからのナトリウム漏洩時にも、燃料発熱部頂部レベル以下にナトリウム液位が低下しないように、容積制限されていること。

② 貯蔵燃料の発熱率

25 kW であること。

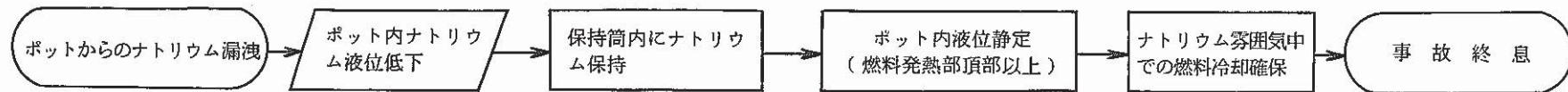
貯蔵中（Ar ガスセル方式）



(a) ポット内ナトリウム保持対策をとらない場合の事象推移

- 129 -

貯蔵中（Ar ガスセル方式）



(b) ポット外に保持筒を設けることによりナトリウム液位の過度の低下を防止した場合の事象推移

図 4.4-21 Ar ガスセル内貯蔵方式におけるポットナトリウム漏洩時 事象推移

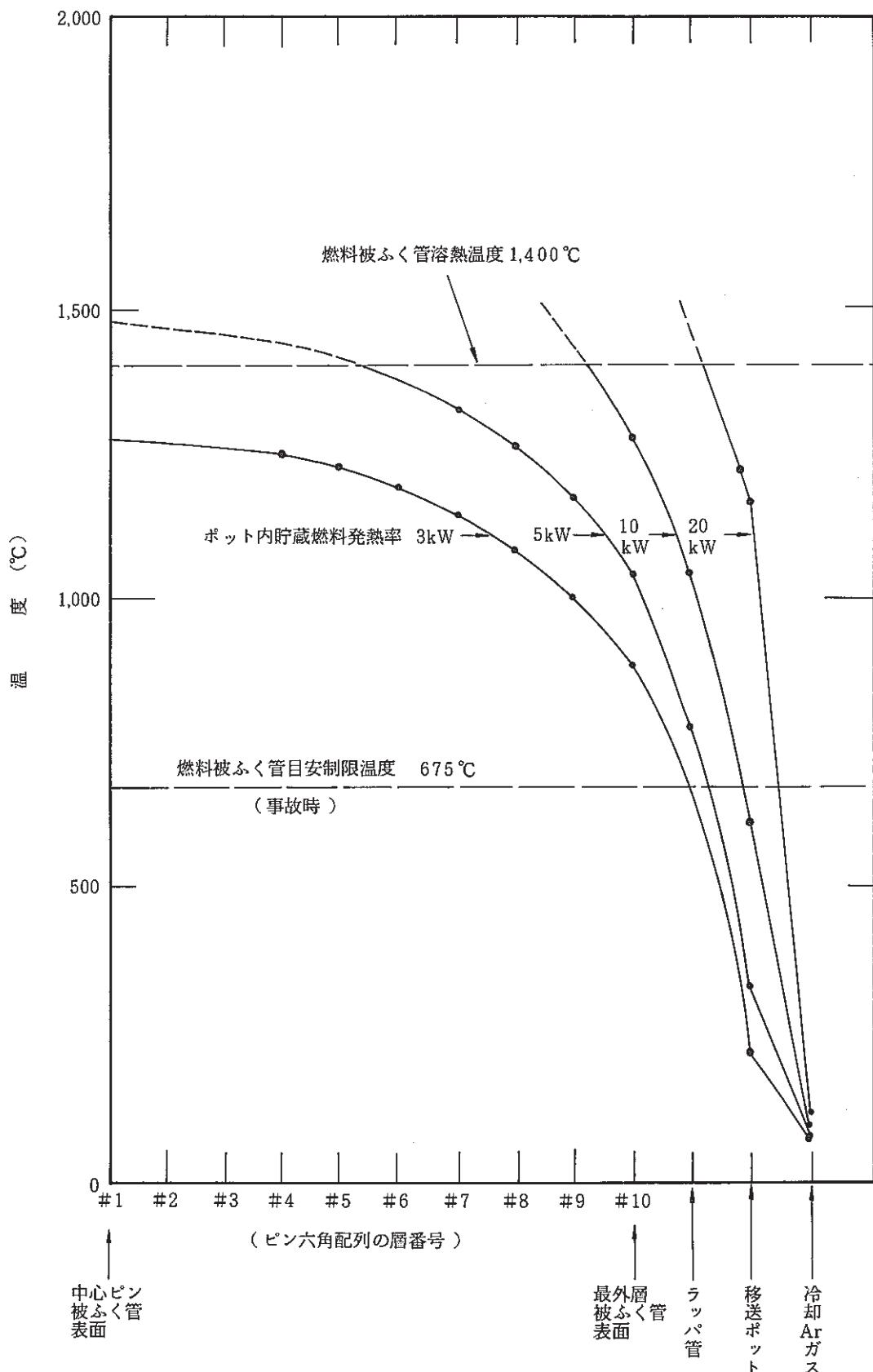
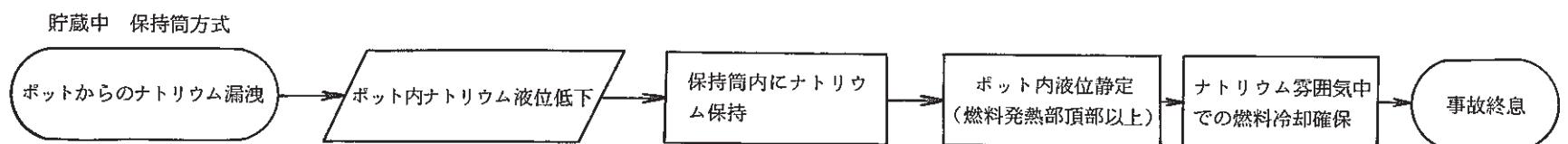


図 4.4-22 Ar ガスセル貯蔵方式におけるポットナトリウム漏洩時各部温度分布
(ポット内ナトリウム液位保持対策をとらない場合)



発熱率 25 kW以下の燃料に
対しては燃料被ふく管最高
温度は事故時の制限温度以
下に収まる。

図 4.4-23 保持筒内貯蔵方式におけるポットからのナトリウム漏洩時 事象推移

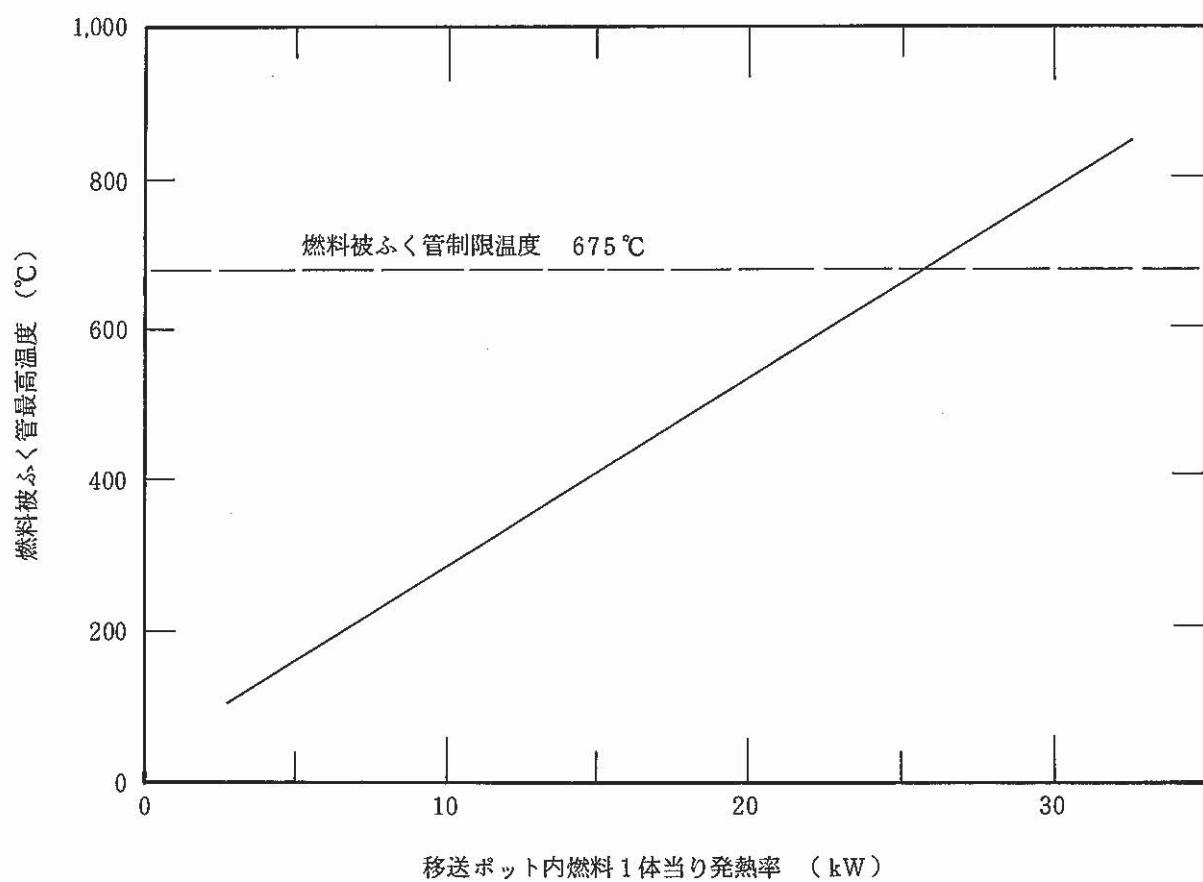


図 4.4-24 保持筒内貯蔵時の移送ポット破損における燃料被ふく管最高温度

(2) 全電源喪失事故

全電源喪失による強制通風停止を想定して、燃料被覆管温度の時間変化を解析し、強制通風復帰までの余裕時間を検討する。

予想される事象推移を図 4.4-25 に示す。

(a) 解析条件

① ポット内の燃料、機器、

ナトリウムの初期温度 通常時の最高温度 550 °C とする。

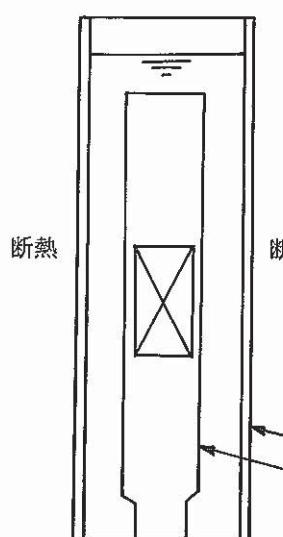
② 熱計算境界条件

事故時の伝熱条件の同定が困難なため、ポット外面で断熱と保守的に仮定する。

③ ポット内熱容量

70 kcal/°C (付-7)

(b) 解析モデル



ポット内部は一様温度で
上昇すると仮定

温度上昇率

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q \times 860 \times \frac{1}{60}}{C} \quad (\text{°C/min})$$

Q : 発熱率

C : ポット内熱容量 (= 70 kcal/°C)

制限温度に至るまでの時間

$$t_{crit} = (675 - T_0) / \frac{dT}{dt}$$

T₀ : 初期温度 (= 550 °C)

(c) 解析結果

図 4.4-26 に、燃料の発熱率と燃料被覆管が制限温度に至るまでの時間の関係を示す。

(d) 安全上の要求条件

全電源喪失事故は、安全評価上の通例として短期間(30分)の想定でよい。上記の解析結果から、ポット内貯蔵燃料の最高発熱率は20 kW 以下とすることが必要である。

(3) 貯蔵設備に対する安全上の要求条件のまとめ

以上の検討から貯蔵設備に対する安全上の要求条件をまとめると表 4.4-6 のようになる。

表 4.4 - 6 貯蔵設備に対する安全上の要求条件のまとめ

| 安全機能 | 設備・項目名 | 安全上の要求条件 | |
|------------|----------|--|---|
| 1. 未臨界性の維持 | 燃料貯蔵設備 | 燃料の貯蔵配列ピッチを未臨界性維持のために必要十分な間隔とすること。 | |
| 2. 燃料冷却 | 保持筒 | Arガスセル内貯蔵方式 | 保持筒内貯蔵方式 |
| | | • ポットよりのナトリウム漏洩時にポット内ナトリウム液位が燃料発熱部頂部より上に保持されるように保持筒を設けること。 | • ポットよりのナトリウム漏洩時にポット内ナトリウム液位が燃料発熱部頂部より上に保持されるように内容積を制限すること。 |
| | 貯蔵燃料の発熱率 | Arガスセル内貯蔵方式 | 保持筒内貯蔵方式 |
| | | • 保持筒を設けることを前提として 12 kW/体以下 (炉停止後約 56 日) | • 20 kW/体以下 (炉停止後約 21 日) |

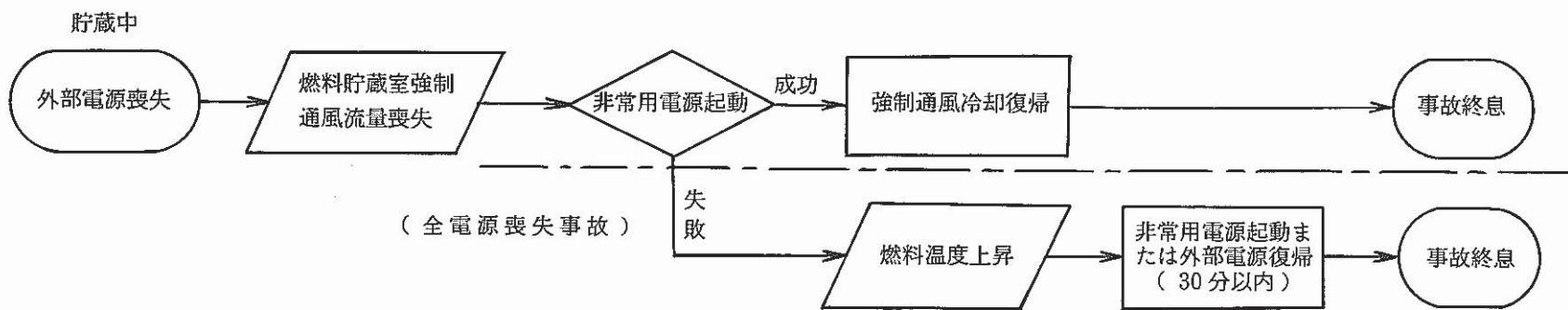


図 4.4-25 電源喪失による強制通風冷却喪失時 事象推移

被覆管が制限温度に至るまでの時間

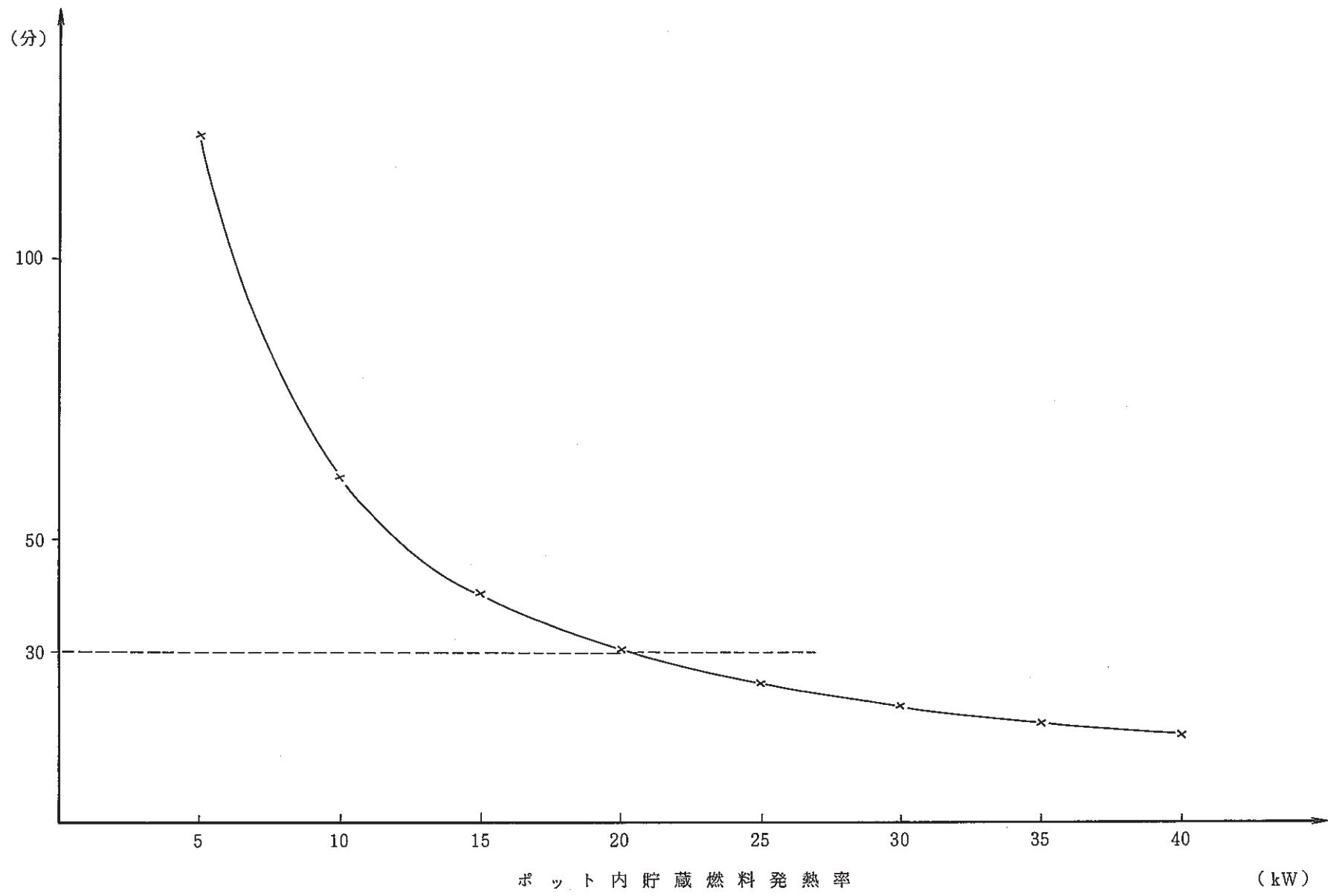


図4.4-26 全電源喪失時の時間余裕

4.4.6 燃料移送中に於ける異常事故解析

使用済燃料移送中に於ける安全性に関する評価を行った。

(1) 燃料移送中に要求される安全機能

燃料移送中に要求される安全機能としては、以下のものが考えられる。

- ① 燃料移送中の冷却
- ② 燃料移送中の燃料の機械的損傷防止
- ③ 燃料移送中の事故時の FP 格納（セルバウンダリ健全性の維持）

(2) 安全機能にかかわる事象

安全機能にかかわる事象としては以下のものが考えられる。

(i) 燃料移送中の冷却

(a) 冷却設備の異常

- Ar ガスセル雰囲気冷却系の異常

(b) 燃料移送用機器の異常

- ポットの移送能力喪失
- ポットからのナトリウム漏洩
- ポットの落下

(c) 動力源の喪失（電源喪失による燃料移送能力およびセル雰囲気冷却能力の喪失）

(ii) 燃料移送中の燃料の機械的損傷防止

(a) 燃料への過荷重印加

- 高速での燃料着地
- 挿入・引抜および昇降未完時の水平移送・ポット脱落
- 不適切な経路での燃料移送
- 燃料貯蔵部への誤装荷

(b) 燃料の落下・転倒

(iii) 燃料移送中の事故時の FP 格納

(a) 動力源の喪失（電源喪失によるセルバウンダリ冷却機能の喪失）

(3) 基本制限条件

① 移送中燃料の被ふく管温度目安制限値

| | |
|----------------|--------|
| 通常時および異常な過渡変化時 | 675 °C |
| 事故時 | 850 °C |

② 燃料被ふく管溶融温度

1400 °C (ステンレス鋼の融点)

③ FP の大気放出量目安制限値（事故時）

希ガス (γ線 0.5 MeV 換算) 10⁴ Ci

よう素 (I - 131 等価)

1 Ci

(4) コンクリート温度の目安制限値

事故時 (短期)

175 °C

(5) 燃料の発熱率, 燃料ピンギャップ中の FP 存在量

炉停止後21日を経過した燃料を対象とする。

最大発熱量 (1 体)

20 kW

燃料ピンギャップ中 FP 存在量

表 4.4 - 7

(FP が最も多い内側炉心燃料集合体 1 体分)

(4) 評価・検討

(i) 燃料移送中の冷却

(a) Ar ガスセル霧囲気冷却系の異常

冷却系の多重化を安全上の要求条件とする。

(b) 燃料移送用機器の異常

① ポットの移送能力喪失

ポット入り燃料が長期にわたって Ar ガスセル内に滞在した場合を想定する。

イ) 解析条件

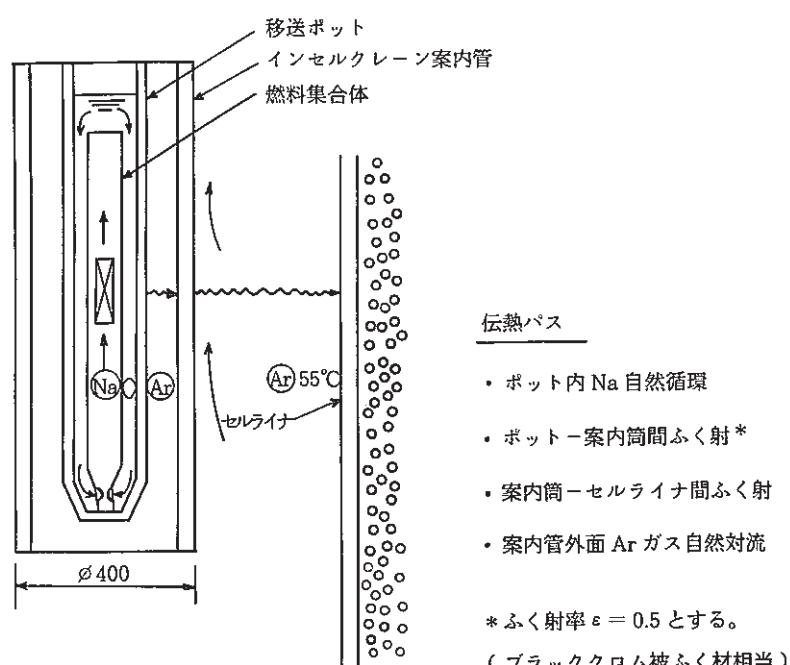
• ポット内燃料の発熱率 20 kW

• 燃料の冷却条件

Ar ガスセル霧囲気調整系によるセル霧囲気冷却は確保

移送ポットを直接冷却する強制冷却系は考慮せず。

ロ) 解析モデル



ハ) 解析結果

燃料中心部の燃料被覆管最高温度は 665 °C となり、移送中の異常な過渡変化に対する制限条件を満足している。

ニ) 安全上の要求条件

発熱率 20 kW の燃料移送に関しては特にない。

② ポットからのナトリウム漏洩

ポットの機械的損傷の原因となる事象、すなわち

- ポットへの過荷重印加
- ポットの落下

が生じないよう、インセルクレーンの走行・昇降駆動制御系およびポット保持装置の、機械的インタロックの完備および多重化を行う。

また、漏洩時の事故拡大防止に対しては、燃料移送中は常時ナトリウム漏洩監視を行い、漏洩が発見された場合は、燃料を速やかに炉内ナトリウム中へ移送して冷却を確保するものとする。ただし、漏洩規模の同定が現状では困難であることから、ナトリウムの瞬時全漏洩も考慮し、燃料過熱による被ふく管損傷を想定して FP の大気放出量評価を後項(iii)-(b)において実施する。

③ ポットの落下

ポットの落下に対しては、ポット保持装置の機械的インタロックおよび多重性に期待する。

(c) 動力源の喪失

設計基準外ではあるが全電源喪失事故(30分)を想定して、燃料移送能力および Ar ガスセル雰囲気冷却系の機能喪失条件下での燃料過熱防止上の要求条件を導く。

① 解析条件

前記 4.4.5 項(2)と同様の方法で、ポット外面断熱条件とし、ポット内の燃料、機器ナトリウムの初期温度を通常時の最高温度 675 °C とする。

燃料発熱率は 20 kW とする。

② 解析モデル

4.4.5 項(2)(b) 参照

③ 解析結果

燃料被覆管温度が事故時の制限温度 850 °C に達するまでの余裕時間は 43 分であり、想定した全電源喪失時間 30 分を上まわっている。30 分後の燃料被覆管温度は 798 °C である。

④ 安全上の要求条件

燃料の発熱が 20 kW であれば特に無い。

(ii) 燃料移送中の燃料の機械的損傷防止

インセルクレーンの走行、昇降駆動機構およびポット保持装置の機械的インタロックの完備および多重化を行う。

(iii) 燃料移送中の事故時の FP 格納

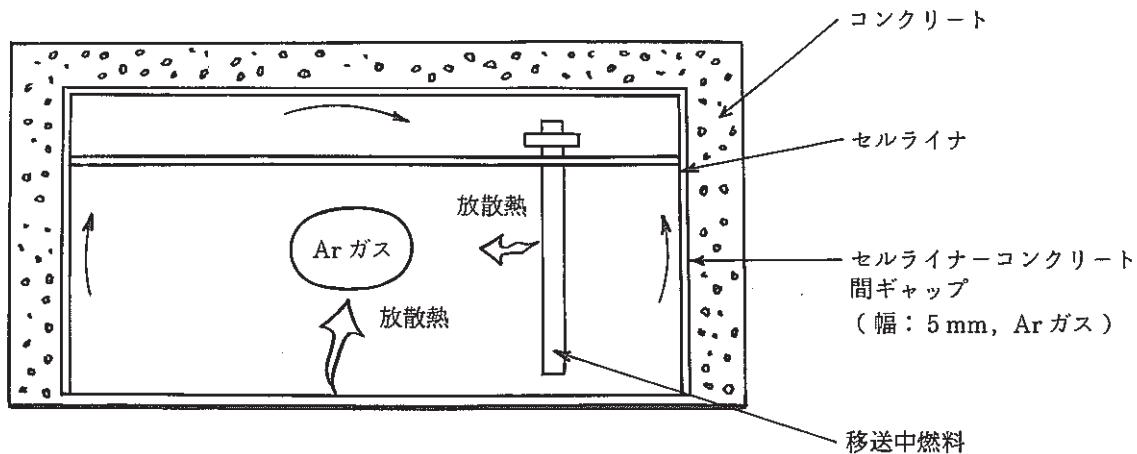
(a) 動力源の喪失（電源喪失によるセルバウンダリ冷却機能の喪失）

30分間の全電源喪失事故を想定し、セル雰囲気調整系の機能が停止した場合の Ar ガスセルのコンクリート温度変化を TRUMP コードにより解析した。

① 解析条件

- 訳藏中の燃料（炉心燃料 119 体、ブランケット 38 体）よりセル床を介しての放散熱量 60 kW（炉心燃料発熱量 20 kW に相当）
- 移送中燃料 1 体からの放散熱量
20 kW
- Ar ガスセル雰囲気、セルライナ、コンクリートの初期温度
55 °C

② 解析モデル



伝熱パス

- 放散熱 → Ar ガス
- Ar ガス → セルライナ：自然対流
- セルライナ → コンクリート：熱伝導（空気ギャップ 5 mm 考慮）
- コンクリート内部：熱伝導（外面は断熱とする）

③ 解析結果

全電源喪失の Ar ガスセル型コンクリート温度の時間変化を図 4.4.-27 に示す。

事故発生後 30 分間のコンクリート最高温度は 65 °C であり、事故時の制限温度以下である。

④ 安全上の要求条件

特になし。

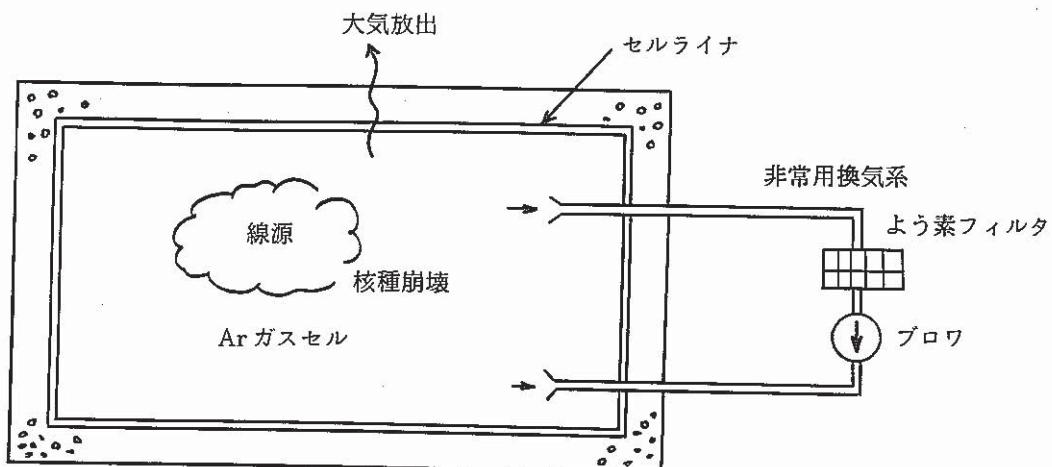
(b) 事故時の公衆被曝防止対策

移送ポット内ナトリウム中の燃料 1 体が破損し 1 燃料集合体中に存在する FP の全量がナトリウム中に放出された場合を想定し、FP 大気放出量を評価して、公衆被曝防止上の条件を検討した。

① 解析条件

- 破損燃料 炉停止 21 日後の内側炉心燃料
- FP の Na 中放出量
燃料集合体 1 体のギャップ中 FP が全量ポット内ナトリウム中に放出されると仮定。
- Ar ガスセル漏洩率 事故時 $0.1\%/\text{day} \sim 1\%/\text{day}$
- 非常用循環系の設置
よう素フィルタ よう素除去効率：95 %
循環風量 100 回/day \sim 300 回/day

② 解析モデル



③ 解析結果

希ガス、よう率の大気放出量を次図に示す。

- セル漏洩率の影響 図 4.4-28
- 非常用循環系循環風量の影響 図 4.4-29
- 非常用循環系起動遅れ時間の影響 図 4.4-30

以上の結果から公衆被ばくに関する安全上の要求条件を次の通りとする。

- 非常用循環系 循環風量 300 回/day 以上

- 非常用循環系 フィルタよう素除去効率 95 %以上
- " 起動遅れ時間 30 分以下
- Ar ガスセルライナ漏洩率 0.4 %/day 以下

(5) 安全上の要求条件のまとめ

以上の検討結果より、安全上の要求条件をまとめると表 4.4-8 のようになる。

評価した項目の中で最も厳しいと予想される事象は移送中のポットからのナトリウム漏洩である。本事象で予想される事象推移を図 4.4-31に示す。

漏洩規模が大きく移送中に燃料発熱部が Ar ガス雰囲気中に露出するような事態が生じると、Ar ガスセル内貯蔵時のポットナトリウム漏洩事故と同様、発熱量が 3 kW程度の低発熱燃料においても、被ふく管は事故時の制限温度を越え、さらに高発熱の燃料では被ふく管の溶融に至る可能性がある。

現状ではポットからのナトリウム漏洩に至る事象及び漏洩規模の同定が困難であるため、安全評価のロジックとしては、大規模な漏洩を想定して事故の拡大防止対策及び公衆被曝防止対策を導く必要がある。

しかし、被覆管の溶融まで想定すると公衆被曝を防止することは困難と予想されることから、ポットからのナトリウム漏洩に至る事象の発生防止、ないし漏洩規模の限定を目指したシステムの構築が必要である。

表 4.4-7 燃料ピンギャップ中 FP 量

(炉停止21日経過後の内回り炉心燃料集合体1体分)

| | 核種 | ギャップ内存在量 (Ci) |
|-------|-----------|-----------------------|
| よ う 素 | I - 131 | 4.63×10^4 |
| | I - 132 | $< 10^{-10}$ |
| | I - 133 | 1.20×10^{-2} |
| | I - 134 | $< 10^{-10}$ |
| | I - 135 | $< 10^{-10}$ |
| 希ガス | Kr - 83m | $< 10^{-10}$ |
| | Kr - 85m | $< 10^{-10}$ |
| | Kr - 85 | 2.00×10^3 |
| | Kr - 87 | $< 10^{-10}$ |
| | Kr - 88 | $< 10^{-10}$ |
| | Xe - 131m | 5.97×10^2 |
| | Xe - 133m | 9.32×10^1 |
| | Xe - 133 | 3.00×10^4 |
| | Xe - 135m | $< 10^{-10}$ |
| | Xe - 135 | $< 10^{-10}$ |
| | Xe - 138 | $< 10^{-10}$ |

表 4.4 - 8 Ar ガスセルでの燃料移送中の安全性に関する安全上の要求条件

| 安 全 機 能 | 設 備・項 目 名 | 安 全 上 の 要 求 条 件 |
|---------------------|--|---|
| 1. 燃料移送中の冷却 | 燃料移送系 | <ul style="list-style-type: none"> • 移送中は常時漏洩監視を行えること。 • 移送中にポットよりの漏洩が発見された場合、速やかに燃料を炉内ナトリウム中に移送して冷却を確保できること。 • 通常取扱時に移送ポットのみを炉内に移送する前にもナトリウム漏洩監視を行、漏洩が発見されたポットは使用済燃料移送に使用しないこと。 |
| 2. 燃料移送中の燃料の機械的損傷防止 | インセルクレーン • 走行、昇降駆動制御系 • ポット保持機構 • 案内筒 | <ul style="list-style-type: none"> • 挿入、引抜および昇降未完時の水平移送を防止できるインタロック機構を設けること。 • 貯蔵部への挿入完了時以外にポット保持解除が行われないようインタロック機構を設けること。 • 保持機器は多重性を有すること。 • ポットの転倒を防止できること。 |
| 3. 公衆被ばく防止対策 | Ar ガスセルライナ • 漏洩率 非常用循環系 • 循環風量 • よう素除去フィルタ • 起動遅れ時間 | <ul style="list-style-type: none"> • 0.4 %/day 以下とすること。 • 300 回/day 以上とすること。 • 効率 95 % 以上とすること。 • 30 分以下とすること。 |

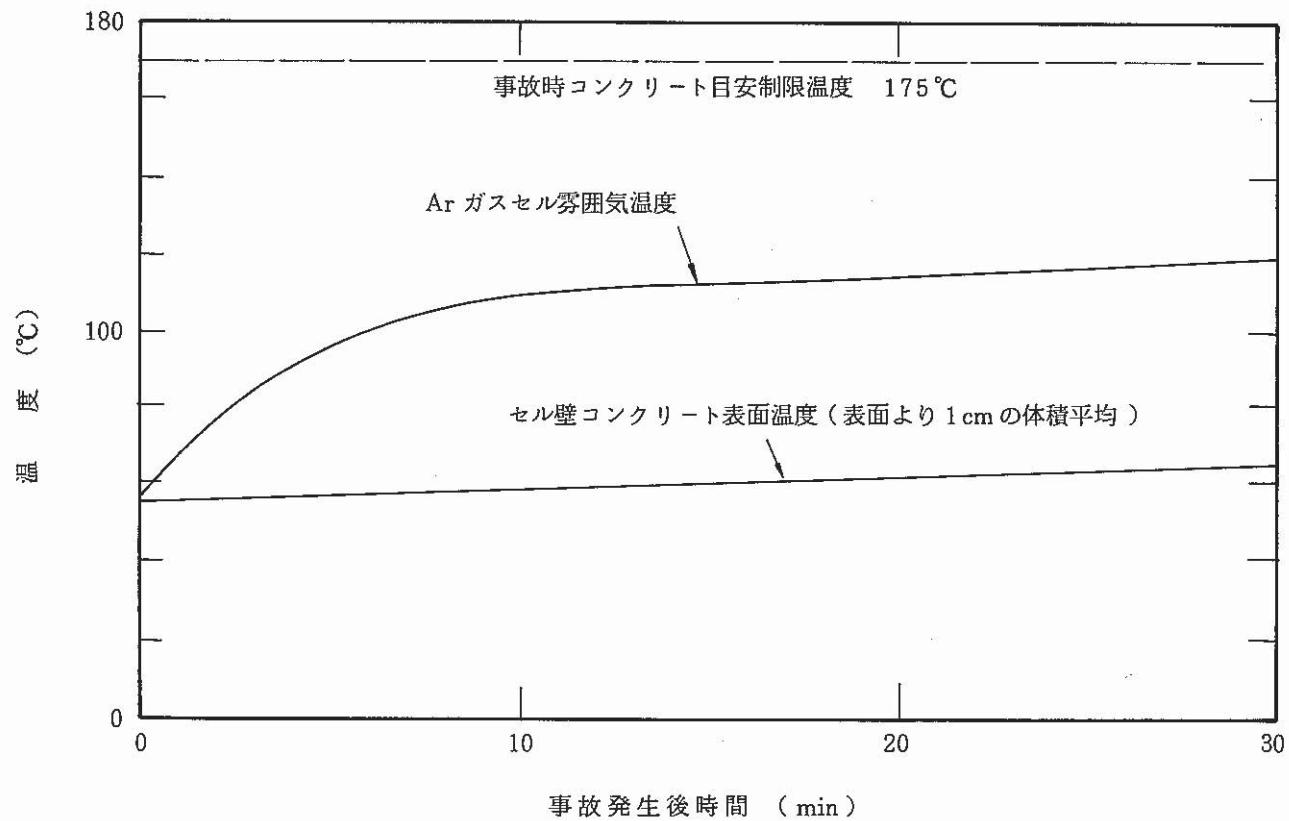


図 4.4-27 全電源喪失時故時の Ar ガスセル壁コンクリート温度の時間変化

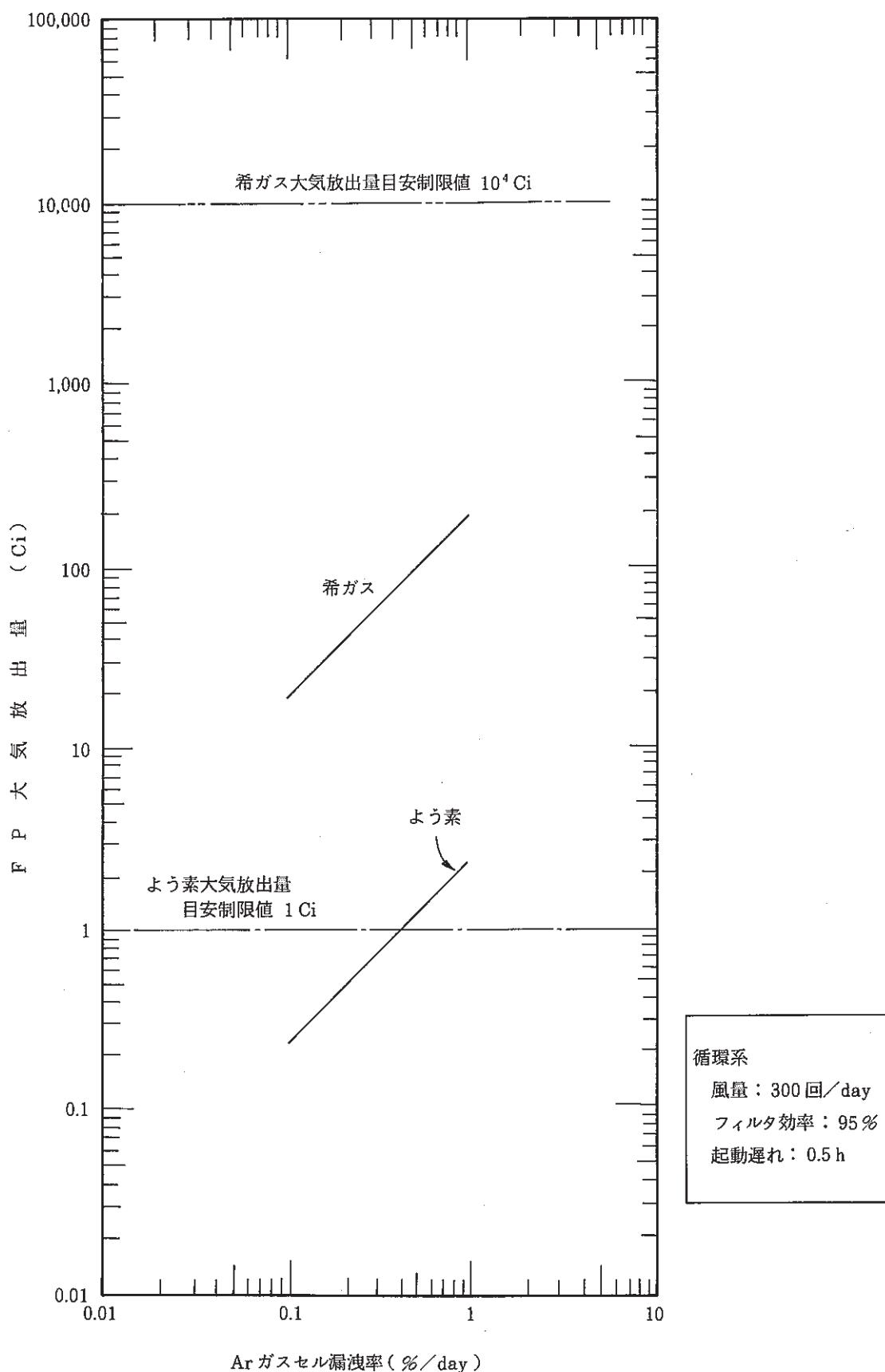


図 4.4-28 Ar ガスセル漏洩率と FP 大気放出量（事故後 30 日間）の関係

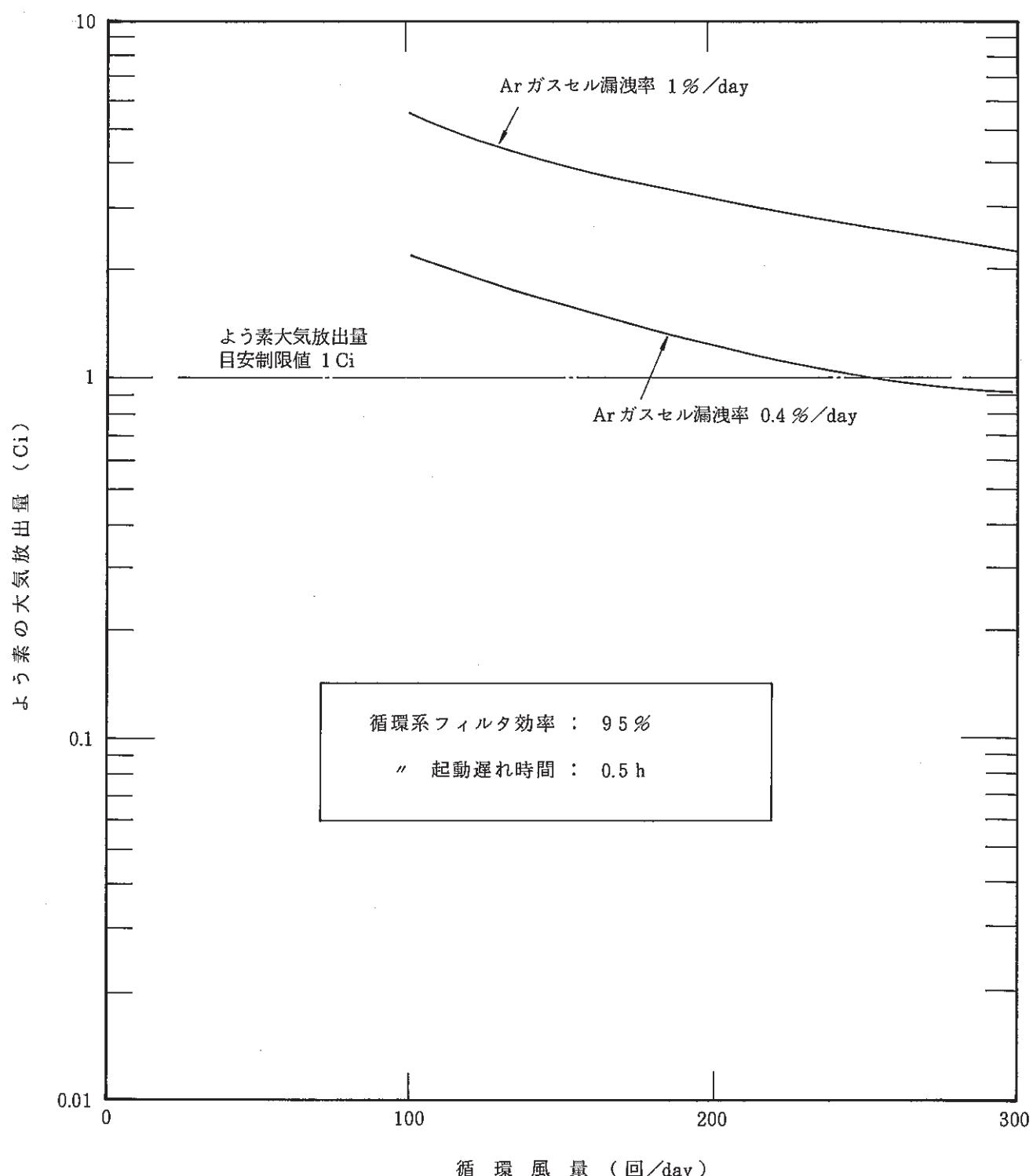


図 4.4-29 非常用循環系風量とよう素の大気放出量(事故後 30 日間)の関係

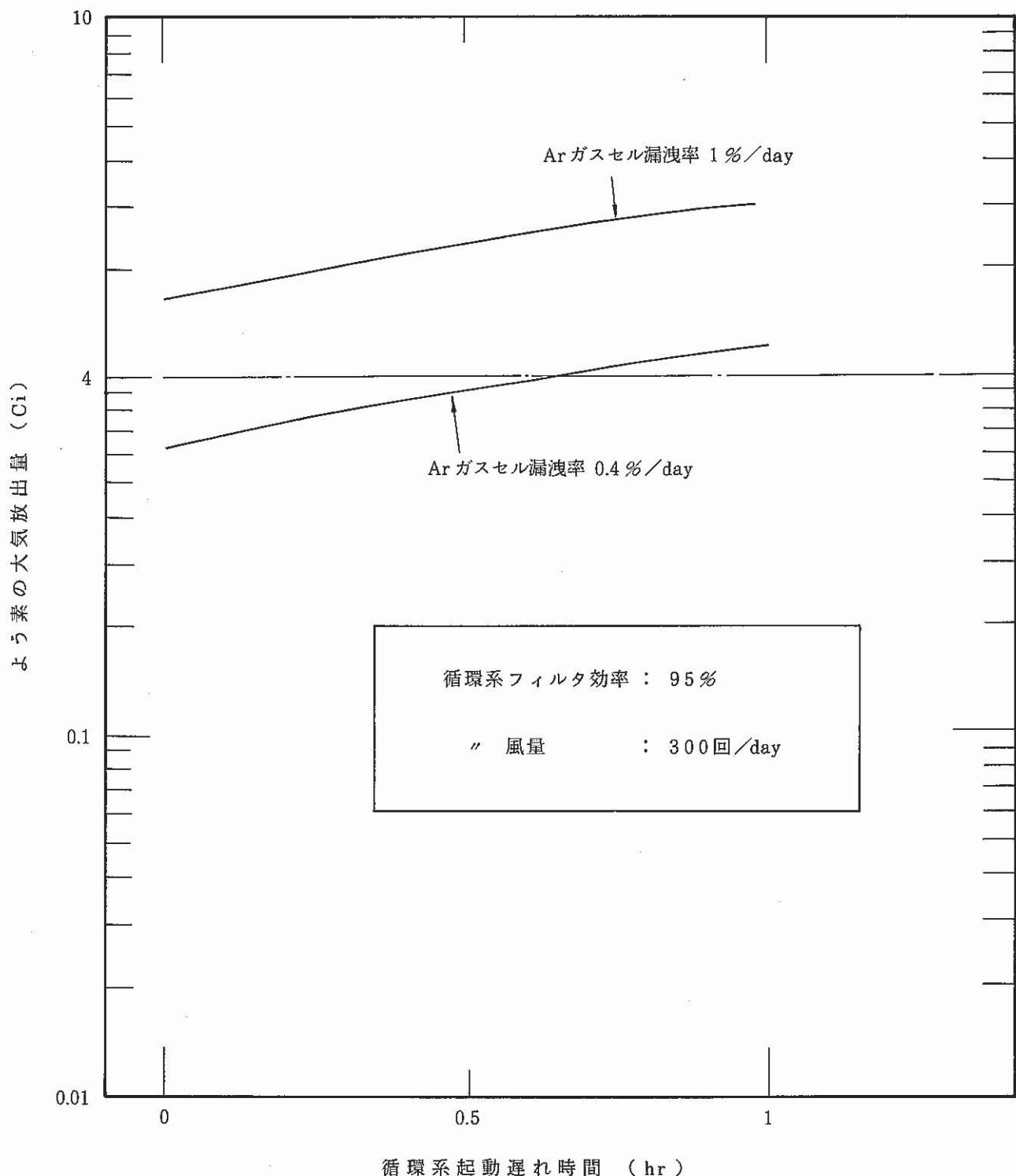


図 4.4-30 非常用循環系起動遅れ時間とよう素の大気放出量（事故後 30 日間）の関係

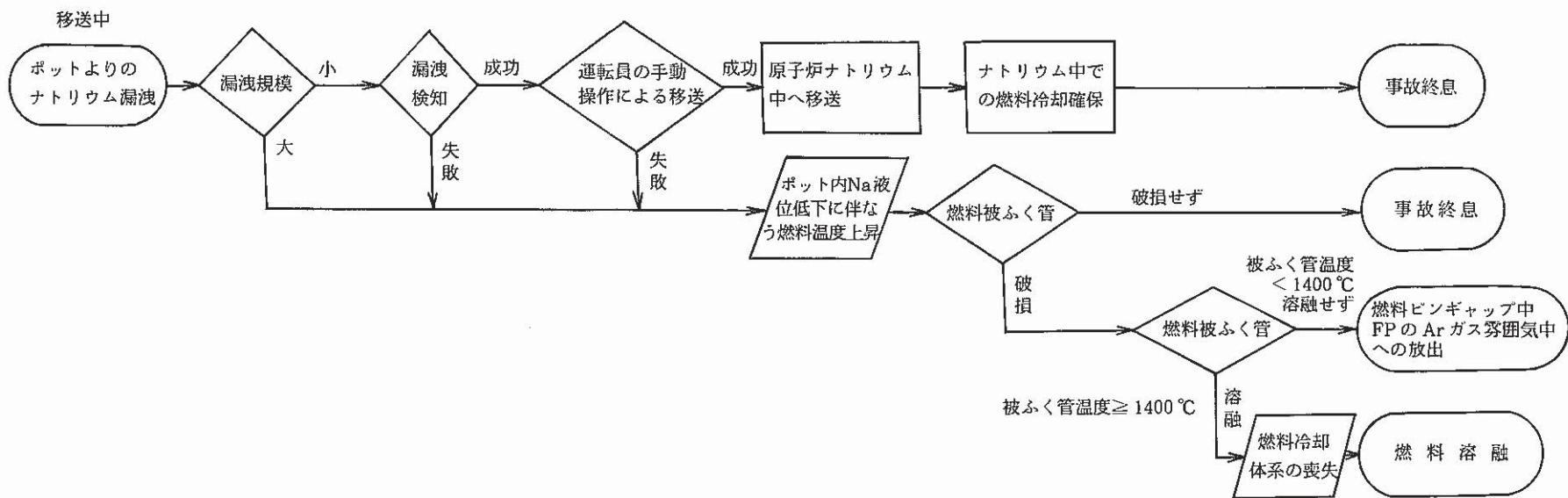


図 4.4-31 移送中のポットよりのナトリウム漏洩時の事象推移

4.5 EVS 方式による燃料取扱系の成立性検討

4.5.1 通常時に於ける除熱性

4.4 に於ける解析結果より、EVS 方式の各燃料貯蔵設備について、通常時に於ける使用済燃料の制限温度 550 °C を満足する崩壊熱（貯蔵可能な使用済燃料の崩壊熱），及び原子炉停止後崩壊熱がそのレベルまで減衰するために要する期間（原子炉停止から EVS による燃料貯蔵が可能となるまでに要する期間）を表 4.5-1 に示す。

EVS 方式は、炉内に於ける使用済燃料の減衰待ち貯蔵を行わない方式であるため、原子炉停止直後の崩壊熱が高い使用済燃料の貯蔵を必要とする。表 4.5-1 に示した貯蔵開始可能時期は最大発熱量を持つ使用済燃料を貯蔵するとした場合の値であるが、崩壊熱をノミナル値で評価した場合ナトリウムポット EVS 方式では、アルゴンガスセル内貯蔵方式の強制通風で約 1 週間（32 kW に対応），保持筒内貯蔵方式の強制通風で約 3 週間（20 kW に対応），EVS による貯蔵開始を遅らせる必要があることがわかる。即ち、それだけ燃料交換作業を遅らせることが必要になる。一方、ナトリウムキャスク EVS 方式では、ヘリウムガスギャップがないキャスクを用いても、原子炉停止後 17 週間経過しないと使用済み燃料の崩壊熱が貯蔵可能なレベル（5.5 kW）まで低下しないため、貯蔵することが出来ない。燃料交換作業は原子炉の定期検査期間に実施するとして、定期検査に要する時間を仮に 8 週間としても、燃料交換作業は定期検査期間に終了しないことになり、稼働率の低下につながるものと考えられ、ナトリウムキャスクは EVS 方式の崩壊熱減衰待ち貯蔵には適さないと考えられる。

4.5.2 事故時に於ける除熱性

そこでナトリウムポット EVS 方式について、事故としてポット破損によるナトリウム漏洩事故を想定した場合の除熱性まで考えると、保持筒内貯蔵方式では 25 kW の使用済燃料まで事故時の制限温度 675 °C を保ちうるが、アルゴンガスセル内貯蔵方式の場合は 3 kW の使用済燃料でも事故時の制限温度を越える（図 4.4-22）ことから、EVS 方式の燃料貯蔵設備としては保持筒内貯蔵方式が有望と考えられる。

表 4.5-1 各種 EVS 方式の貯蔵可能使用済燃料崩壊熱及び貯蔵開始可能時期

| 貯 蔵 方 式 | | | 貯蔵可能な使用済燃料の崩壊熱 | *** 貯蔵開始可能時期 (炉停止後) |
|---------------------|-------------------|--|----------------|-----------------------------|
| ナトリウムキャスク EVS 方式 | ヘリウムガスギャップ あ り | 自然通風 | * 5.6 kW/体 | 約 1/2 年 |
| | ヘリウムガスギャップ な し | 自然通風 | * 8.9 kW/体 | 約 17 週 |
| ナトリウムポット EVS 方式 | Ar ガスセル内貯蔵方式 | 自然通風 | 5.5 kW/体 | 約 1/2 年 |
| | | 強制通風 ($3 \times 10^5 \text{ kg/h}$) | 32 kW/体 | 約 1 週 |
| | 保持筒内貯蔵方式 | 自然通風 | ** 5 kW/体 | 約 1 年 |
| | | 強制通風 ($4 \times 10^5 \text{ kg/h}$) | ** 20 kW/体 | 約 3 週 |

* 7体キャスクに収納すると仮定

** ポット外面と保持筒内面のふく射率 $\epsilon = 0.5$

*** 最大発熱を持つ使用済燃料の貯蔵

(ノミナル値ベースで評価した場合)

4.6 EVS方式による燃料取扱系のシステム化検討

4.5.1及び4.5.2において、EVS方式の燃料貯蔵設備としては、保持筒内貯蔵によるナトリウムポットEVS方式が有望であり、強制通風冷却によって約20kWの除熱が可能で、それに対応する発熱レベルまで使用済燃料の崩壊熱を下げるまでには、原子炉停止後約3週間必要とすることを示した。ここでは、EVS方式による燃料取扱系として、ナトリウムポットEVS方式による燃料取扱系を基本にしたシステム化検討を行う。

4.6.1 使用済燃料交換計画

4.5.1では、ナトリウムポットEVS方式による燃料取扱系は、原子炉停止後3週間を経過しないと燃料交換作業が開始出来ないとしたが、これは最大発熱量を持つ使用済燃料を想定した場合であり、外側炉心燃料、ブランケット燃料等の崩壊熱は原子炉停止後3週間を待たずに20kW以下にさがるものと考えられるので、低い崩壊熱を持つ使用済燃料から順に交換することにより、実際の燃料交換作業はもっと早い時期から開始することが可能になる。

いま、交換すべき使用済燃料を、その出力分担によって、表4.6-1に示すように4つに分類する。使用済燃料の崩壊熱は、その燃料の出力分担にほぼ比例するとすると、出力領域に従ってその崩壊熱レベルを推定することが出来る。各領域の使用済燃料の崩壊熱曲線を図4.6-1に示す。これは、表4.6-1で分類したI～IIIの領域の燃料を、領域Iは9.5MW／体、領域IIは9.0MW／体、領域IIIは8.0MW／体の出力分担を持つと安全側に仮定し、それぞれの崩壊熱を図4.4-1に示した内側炉心燃料（出力分担：9.5MW／体）の崩壊熱から、出力分担の比によってもとめたものである。領域IVについては、ブランケット燃料の崩壊熱曲線（図4.4-2）を、そのまま用いた。ただし、図4.4-1及び図4.4-2に示した崩壊熱はORIGENコードによる解析結果のノミナル値であるのに対して、図4.6-1に示した崩壊熱は不確定性を考慮し、図4.4-1及び図4.4-2に示した崩壊熱にファクター1.2を乗じたものを元に求めている。（表4.6-2）

図4.6-1から、崩壊熱が20kW以下にさがるのは、領域Iの使用済燃料は原子炉停止後21日、領域IIは18日、領域IIIは14日、領域IVは3日（領域IVについては炉停止直後に20kW以下にさがっていると考えられるが、安全側に考えて3日）であることが分かる。すなわち、原子炉停止後4日目から領域IVの使用済燃料の交換作業が開始出来、15日目からは領域IIIの使用済燃料、19日目からは領域IIの使用済燃料、そして22日目からは領域Iの使用済燃料の交換作業が開始出来ることになる。

ここで、1日に交換出来る燃料集合体数を最大8体（1体／2時間：1日の最大作業時間16時間）と仮定して燃料交換を行うとすれば、図4.6-2に示すような燃料交換計画例によって原子炉停止後30日目に燃料交換を終了出来ることが分かる（最小燃料交換期間20日）。もちろん、燃料交換作業の高速化及び作業時間の増加によって1日に交換出来る燃料集合体数を増加させ

ることができれば、さらに燃料交換期間の短縮が可能になるが、最終的には領域Ⅰの燃料交換を原子停止後22日目から、何日間で終了させるかがクリティカルになると考えられる。

4.6.2 使用済燃料貯蔵計画

(1) 強制通風冷却から自然通風冷却への切り替え

ナトリウム入りポットに入れられた状態で炉容器から取り出された使用済燃料はそのまま、外面を強制通風冷却されている保持筒の中に貯蔵されるが、貯蔵期間が長期に渡る場合、崩壊熱が減衰し、自然通風でも除熱が可能な領域にはいる。図4.4-12より、通風ダクトにフィルタを設置したケースで、5 kWまで崩壊熱が減衰すれば自然通風による除熱が可能となることがわかる。

4.6.1で行ったように、使用済燃料を4つの領域に分類し、それぞれの領域の使用済燃料の崩壊熱曲線を求めると図4.6-3のようになる。図より崩壊熱が5 kWを下回るのは、領域Ⅰが原子炉停止後250日、領域Ⅱが原子炉停止後235日、領域Ⅲが原子炉停止後200日であることがわかる。即ち、最大発熱量を持つ領域Ⅰの使用済燃料を考えても原子炉停止後250日目から強制通風による冷却を停止し、自然通風冷却に切り替えることができることがある。領域Ⅳについては図4.6-1より原子炉停止後8日で崩壊熱が5 kW以下になるので、燃料交換作業の開始が原子炉停止後11日から行うとすれば(図4.6-2 CASEⅡ)炉外取出時から自然通風冷却が可能であることがわかる。

(2) ナトリウムポットからヘリウムガス缶詰への切り替え

更に、貯蔵期間が長期化し崩壊熱が減衰してくると、ポット中のナトリウムが凍結する可能性が生じてくる。また、使用済燃料の再処理向け搬出に関しては、使用済み燃料をナトリウムの中に漬けたままで移送するのは望ましくないため、貯蔵中のどこかの時点で、使用済み燃料をナトリウムポットから取り出す必要がある。

(i) ポット内ナトリウム溶融発熱量

図4.6-4にポット内ナトリウムを溶融した状態にしておくために必要な発熱量を示す。これは保持筒が1体だけ単独で存在するとして、それを自然対流で冷却した時の計算結果(付-14参照)であるが、仮に燃料貯蔵設備のように多数の保持筒が存在するような体系にも適用出来るとすると、通常考えられる空気温度範囲で約1 kW以下に発熱量が低下するとポット内ナトリウムが凍結することがわかる。そこで余裕をみて約2 kW以下に発熱量が低下するとポット内ナトリウムが凍結するものとする。

(ii) ポット内ナトリウム凍結開始時期

4.6.1で実施したように使用済燃料を、その出力分担によって4つの領域に分類する(表4.6-1)。ただし、ここではナトリウムの凍結を防止することを考えるため、領域Ⅰは9.0 MW/体、領域Ⅱは8.0 MW/体、領域Ⅲは4.5 MW/体の出力分担を持つと低

く仮定する。ここで、それぞれの領域の崩壊熱を図 4.4-1 に示した内側炉心燃料（出力分担：9.5 MW／体）の崩壊熱から、出力分担の比によってもとめる。ただし、図 4.4-1 に示した崩壊熱は ORIGEN コードによる解析結果のノミナル値であるため不確定性を考慮し、ファクター 1.2 を乗じる（表 4.6-3）。図 4.6-5 に各領域の使用済燃料の崩壊熱曲線を示す。図より使用済燃料の崩壊熱が 2 kW 以下に低下するのは原子炉が停止してから、領域 I は 650 日後、領域 II は 580 日後、領域 III は 300 日後であることがわかる。領域 IV については図 4.6-1 より原子炉停止後 40 日で崩壊熱が 2 kW 以下に低下する。即ち、この日数を経過したあとは、何らかのポット内ナトリウムの凍結対策を講じる必要がある。

以上の検討から、使用済燃料はナトリウム凍結防止及び輸送にそなえ、原子炉停止から、領域 I については 650 日後、領域 II については 580 日後、領域 III については 300 日後、領域 IV について 40 日後にナトリウムポットから取り出しガス缶詰に貯蔵するものとする。ガス缶詰貯蔵の除熱能力に関しては 57 年に行われた高速増実証炉・第 2 次概念設計(I)で He ガス・アルミバケットキャスクの場合について解析されており、図 4.6-6 に示すように He ガス 5 ata で 3 kW、1 ata でも 2 kW の除熱が可能であることがわかっている（PNC ZJ 278 83-17(5)）。従って、使用済燃料の崩壊熱を 2 kW までナトリウムポット貯蔵方式で減衰させれば、十分余裕をもってガス缶詰貯蔵に切り替えることが可能であると考えられる。

4.6.3 新燃料の受入れ・貯蔵

新燃料の受け入れは、原子炉停止中、使用済燃料の移送や搬出作業のあい間に実施することにする。

(1) 新燃料の取扱形態

新燃料は、裸で新燃料キャスクに装荷し、サイト内に搬入するものとする。新燃料は裸で Ar ガスセル内に受け入れられ、そこで使用済燃料を搬出した後の移送ポットに装荷される。

移送ポットに装荷された後は、炉内に持ち込まれるまで常に移送ポットごと取扱われる。

(2) 新燃料の移送ポットへの収納

新燃料を移送ポットへ収納する際には、移送ポット内のナトリウムが凝固している可能性があるため、あらかじめ移送ポットを予熱しておく必要がある。

(3) 新燃料の貯蔵

移送ポット内に装荷された新燃料は、そのまま使用済燃料貯蔵設備の空きスペースに貯蔵され、炉内装荷を待つ。

4.6.4 破損燃料の取扱

破損燃料の原子炉容器からの取出し、貯蔵設備への収納は、使用済燃料と同一要領で行われる。

サイト外への搬出についても、使用済燃料と同様にガス缶詰にして、専用キャスクで照射燃料検査施設に搬出するものとする。

この方式の場合、破損燃料取扱のための専用設備を必要としないので、設備の合理化が期待できる。

4.6.5 使用済制御棒の取扱

使用済制御棒の原子炉容器からの取出し、Arガスセルからの搬出は、基本的には使用済燃料の取扱いと同一要領で行われる。

ただし、使用済制御棒は発熱が小さいことから、減衰待貯蔵が不要であるため、原子炉より取出後、短期間でArガスセルから搬出することが可能である。

Arガスセルからの固体廃棄物建屋への搬出は、移送ポットより取出し、裸で炉体廃棄物用キャスクに収納して行う。

4.6.6 EVS方式による燃料取扱系のシステム化

4.6.1～4.6.4での検討より、EVS方式による燃料取扱をまとめると図4.6-7に示すようになる。ここで、強制通風冷却によるナトリウムポット貯蔵には高発熱燃料用貯蔵設備、自然通風冷却によるナトリウムポット貯蔵には低発熱燃料用貯蔵設備というように、専用の貯蔵設備を設けるものとする。さらに、ガス缶詰による貯蔵が可能に成了った使用済燃料は、ただちにガス缶詰にして再処理施設に搬出するか、原子炉建屋と別の使用済燃料貯蔵建屋に移送し、そこで再処理施設への搬出待ちを行うものとする。全体の燃料取扱計画は次のようになる。

原子炉停止後11日目から領域IVの燃料交換を開始し、16日目に終了する。領域IVの使用済燃料は低発熱燃料用貯蔵設備に貯蔵される。原子炉停止後16日目には領域IIIの燃料交換を開始し20日目に終了、直ちに(20日目から)領域IIの燃料交換を開始して22日目に終了する。22日目からは領域Iの燃料交換を開始し30日目に終了する。領域I, II, IIIの使用済燃料は高発熱燃料用貯蔵設備に貯蔵する。

領域Iの燃料交換が終了した後、原子炉停止後40日目から領域IVの使用済燃料をガス缶詰にし、再処理施設もしくは使用済燃料貯蔵建屋に搬出する。

燃料交換作業(定期検査)が終了して原子炉が起動した後、前の運転サイクルの原子炉停止から200日後に領域III、235日後に領域II、250日後に領域Iの使用済燃料を高発熱燃料用貯蔵設備から低発熱燃料用貯蔵設備に移送する。移送終了後、原子炉が起動してから365日後(前の運転サイクルの原子炉停止から435日後)に再び原子炉は燃料交換と定期検査のために停止

する。この時点では低発熱燃料用貯蔵設備に貯蔵してあった領域IVの使用済燃料は、すべて原子炉建屋外に搬出済みであり、高発熱燃料用貯蔵設備に貯蔵してあった領域I, II, IIIの使用済燃料は低発熱燃料用貯蔵設備に移送してあるので、燃料交換は前の燃料交換作業と全く同様に行うことができる。なお、図4.6-7より、それぞれの燃料交換作業、移送作業は全く重複せずに実施することができる事が分かる。

使用済燃料は、ガス缶詰にする場合も一切洗浄せず使用済燃料洗浄設備を削除することによる設備の合理化を狙う。また、この方式であると破損燃料についても特別な設備を必要とせず、他の健全燃料と同一の方法で取扱うことが可能である。

図4.6-8に燃料取扱の流れを示す。

表4.6-1 使用済燃料分類

| 領域 | 対象燃料集合体 | 出力分担 (MW/体) | 集合体数 (内は1回の燃交期間に 交換する集合体数) | 領域別集合体数 (内は1回の燃交期間に 交換する集合体数) |
|-----|---------|----------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| I | 内側炉心 1 | 9.5 | 49 (17) | 193 (65) |
| | 内側炉心 2 | 9.4 | 30 (10) | |
| | 内側炉心 3 | 9.3 | 114 (38) | |
| II | 内側炉心 4 | 8.1 | 30 (10) | 66 (22) |
| | 外側炉心 5 | 8.3 | 36 (12) | |
| III | 外側炉心 6 | 7.8 | 30 (10) | 96 (32) |
| | 外側炉心 7 | 6.0 | 36 (12) | |
| | 外側炉心 8 | 4.8 | 30 (10) | |
| IV | ブランケット | 1.5 | 150 (38) | 150 (38) |

表4.6-2 領域別崩壊熱

| 炉停止後日数 (日) | 0 | 3 | 7 | 14 | 21 | 28 | 56 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 内側炉心燃料崩壊熱 ノミナル値 Ⓐ | 5.64 E 5 | 3.63 E 4 | 2.60 E 4 | 1.93 E 4 | 1.63 E 4 | 1.43 E 4 | 1.03 E 4 |
| ブランケット燃料崩壊熱 ノミナル値 Ⓑ | 1.09 E 5 | 6.78 E 3 | 4.41 E 3 | 3.06 E 3 | 2.53 E 3 | 2.21 E 3 | 1.57 E 3 |
| 領域 I 燃料崩壊熱 Ⓐ × $\frac{9.5}{9.5} \times 1.2$ | 6.77 E 5 | 4.36 E 4 | 3.12 E 4 | 2.32 E 4 | 1.96 E 4 | 1.72 E 4 | 1.24 E 4 |
| 領域 II 燃料崩壊熱 Ⓐ × $\frac{9.0}{9.5} \times 1.2$ | 6.41 E 5 | 4.13 E 4 | 2.95 E 4 | 2.20 E 4 | 1.85 E 4 | 1.62 E 4 | 1.17 E 4 |
| 領域 III 崩壊熱 Ⓐ × $\frac{8.0}{9.5} \times 1.2$ | 5.70 E 5 | 3.67 E 4 | 2.63 E 4 | 1.96 E 4 | 1.66 E 4 | 1.44 E 4 | 1.04 E 4 |
| 領域 IV 崩壊熱 Ⓑ × 1.2 | 1.31 E 5 | 8.14 E 3 | 5.29 E 3 | 3.67 E 3 | 3.04 E 3 | 2.65 E 3 | 1.88 E 3 |

表 4.6-3 領域別崩壊熱

| 炉停止後日数 (日) | 0 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 | 600 | 650 | 700 | 730 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 内側炉心燃料崩壊熱 ノミナル値 Ⓐ | 5.64E5 | 3.60E3 | 3.18E3 | 2.83E3 | 2.55E3 | 2.31E3 | 2.10E3 | 1.92E3 | 1.76E3 | 1.62E3 | 1.55E3 |
| 領域 I 燃料崩壊熱 Ⓐ × $\frac{9.0}{9.5} \times 1.2$ | 6.41E5 | 4.09E3 | 3.61E3 | 3.22E3 | 2.90E3 | 2.62E3 | 2.39E3 | 2.19E3 | 2.00E3 | 1.85E3 | 1.76E3 |
| 領域 II 燃料崩壊熱 Ⓐ × $\frac{8.0}{9.5} \times 1.2$ | 5.70E5 | 3.64E3 | 3.21E3 | 2.86E3 | 2.57E3 | 2.33E3 | 2.12E3 | 1.94E3 | 1.78E3 | 1.64E3 | 1.56E3 |
| 領域 III 燃料崩壊熱 Ⓐ × $\frac{4.5}{9.5} \times 1.2$ | 3.21E5 | 2.05E3 | 1.81E3 | 1.61E3 | 1.42E3 | 1.31E3 | 1.19E3 | 1.09E3 | 1.00E3 | 9.21E2 | 8.81E2 |

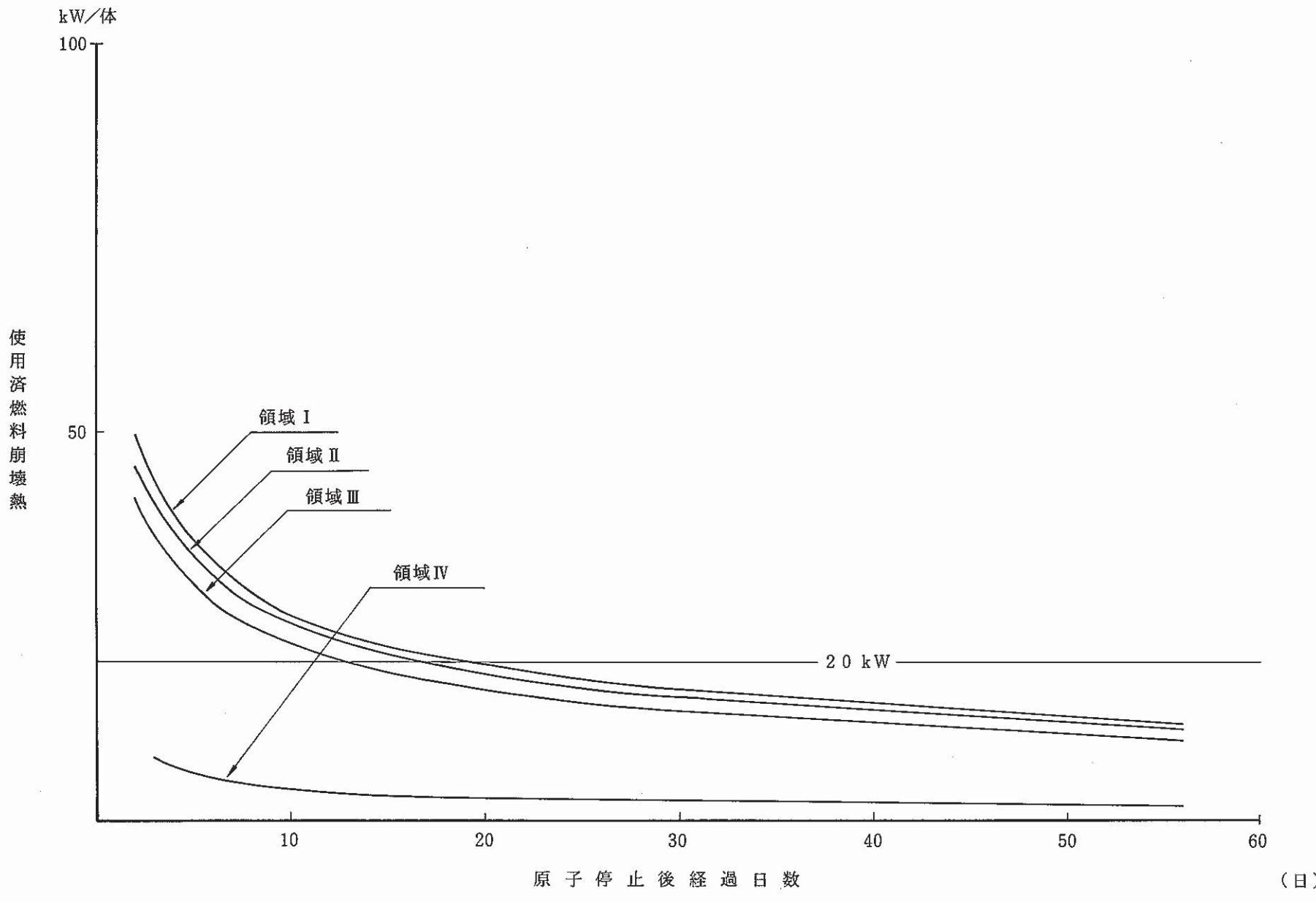


図 4.6-1 領域別使用済燃料集合体崩壊熱

(最大 8体／1日の燃料交換とした場合)

case I

| 炉停止後日数 | 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 | | |
|--------|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|--|
| 交換数 | 領域 I | / | | | | | | | | | | | | | | | | | | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 | | | | | | |
| | 領域 II | / | | | | | | | | | | | | | | | | | | 7 | 7 | 8 | | | | | | | | | | | |
| | 領域 III | / | | | | | | | | | | | | | | | | | | 8 | 8 | 8 | 8 | | | | | | | | | | |
| | 領域 IV | / | | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

- 161 -

case II

| 炉停止後日数 | 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 | | | |
|--------|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|--|--|
| 交換数 | 領域 I | / | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | | | |
| | 領域 II | / | | | | | | | | | | | | | | | | | | 7 | 8 | 7 | | | | | | | | | | | | |
| | 領域 III | / | | | | | | | | | | | | | | | | | | 7 | 8 | 8 | 8 | 1 | | | | | | | | | | |
| | 領域 IV | / | | 5 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

燃交期間 最小 20 日

図 4.6-2 燃料交換計画例

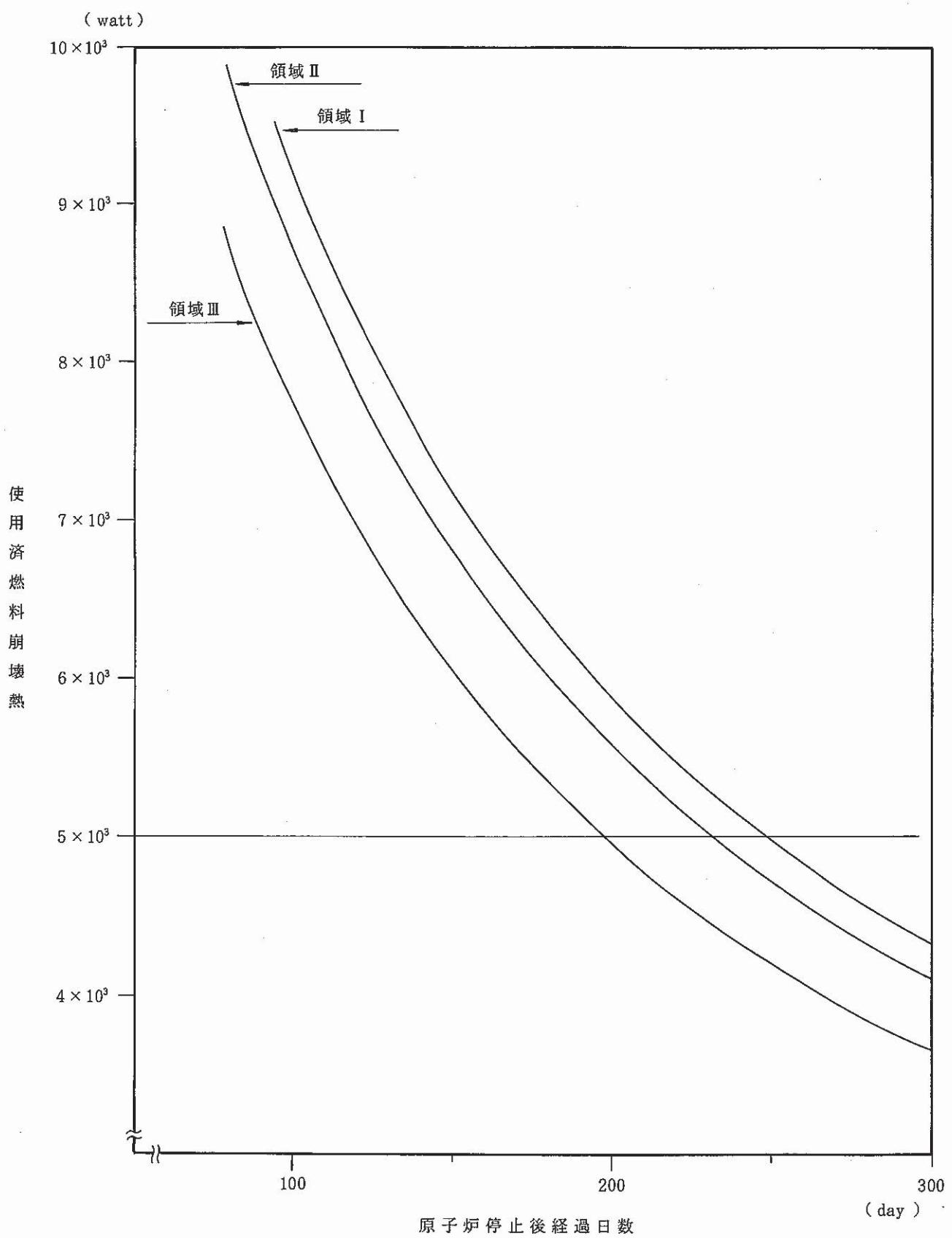


図 4.6-3 領域別使用済燃料集合体崩壊熱

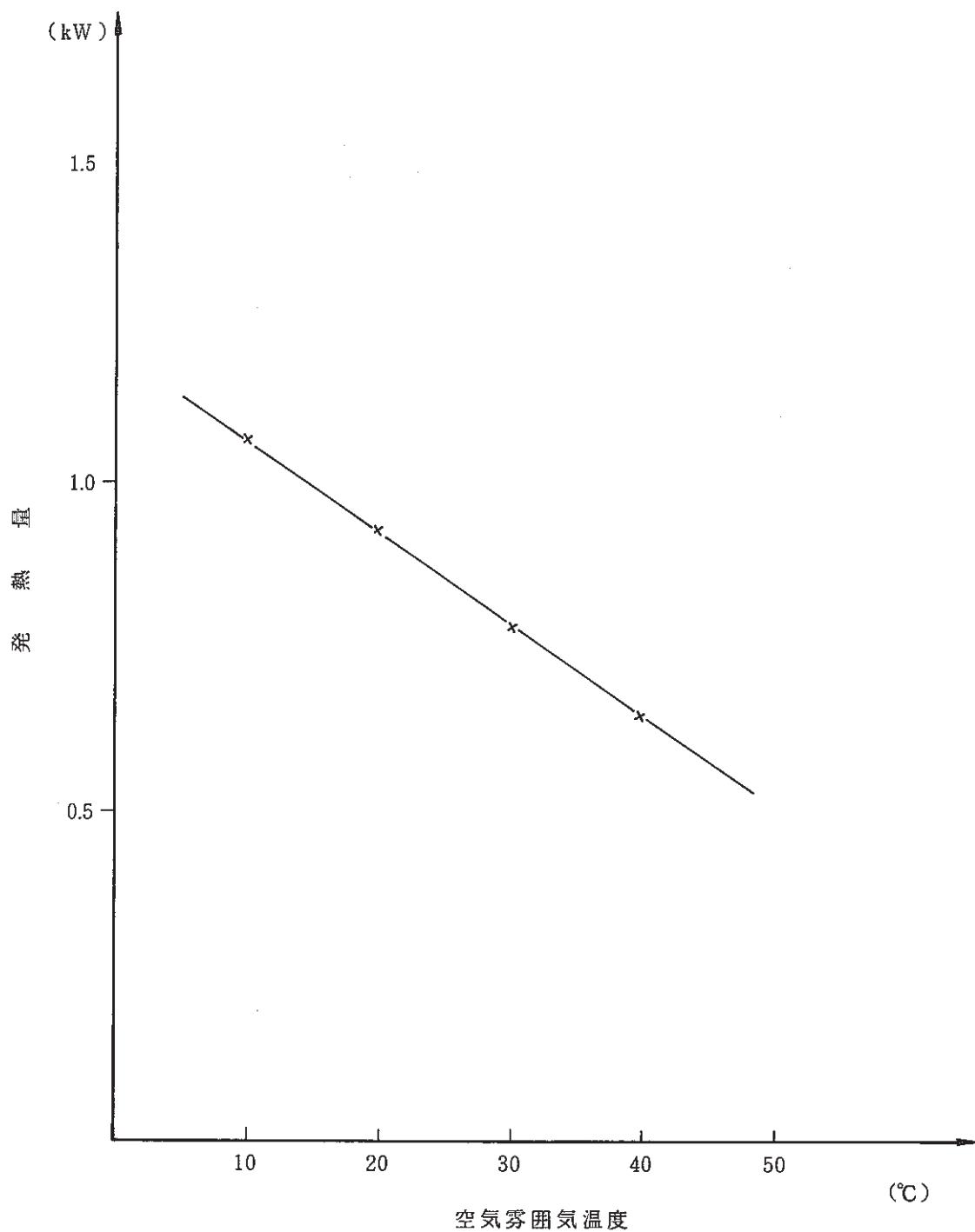


図 4.6-4 ナトリウム溶融のための必要発熱量

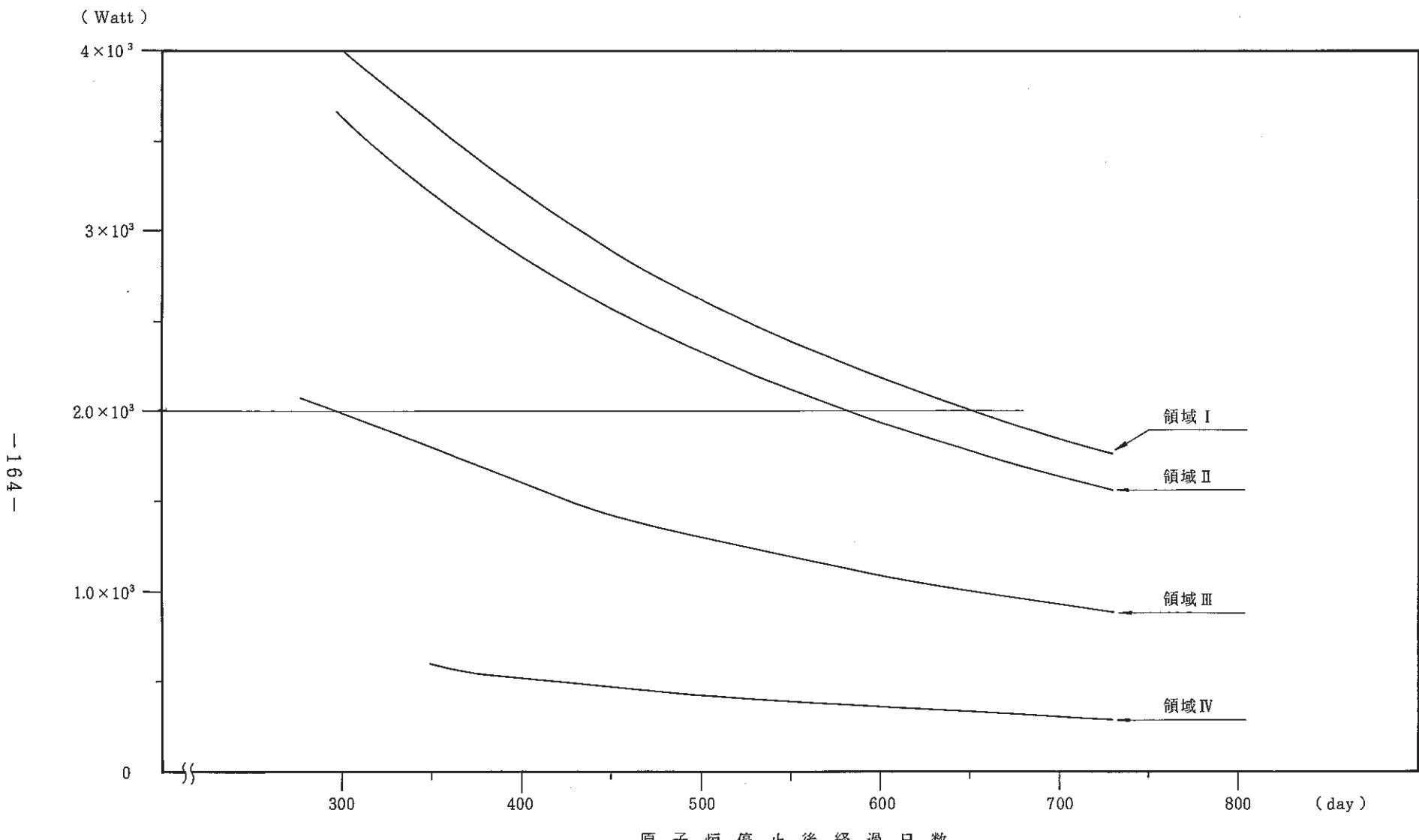


図 4.6-5 領域別使用済燃料集合体崩壊熱

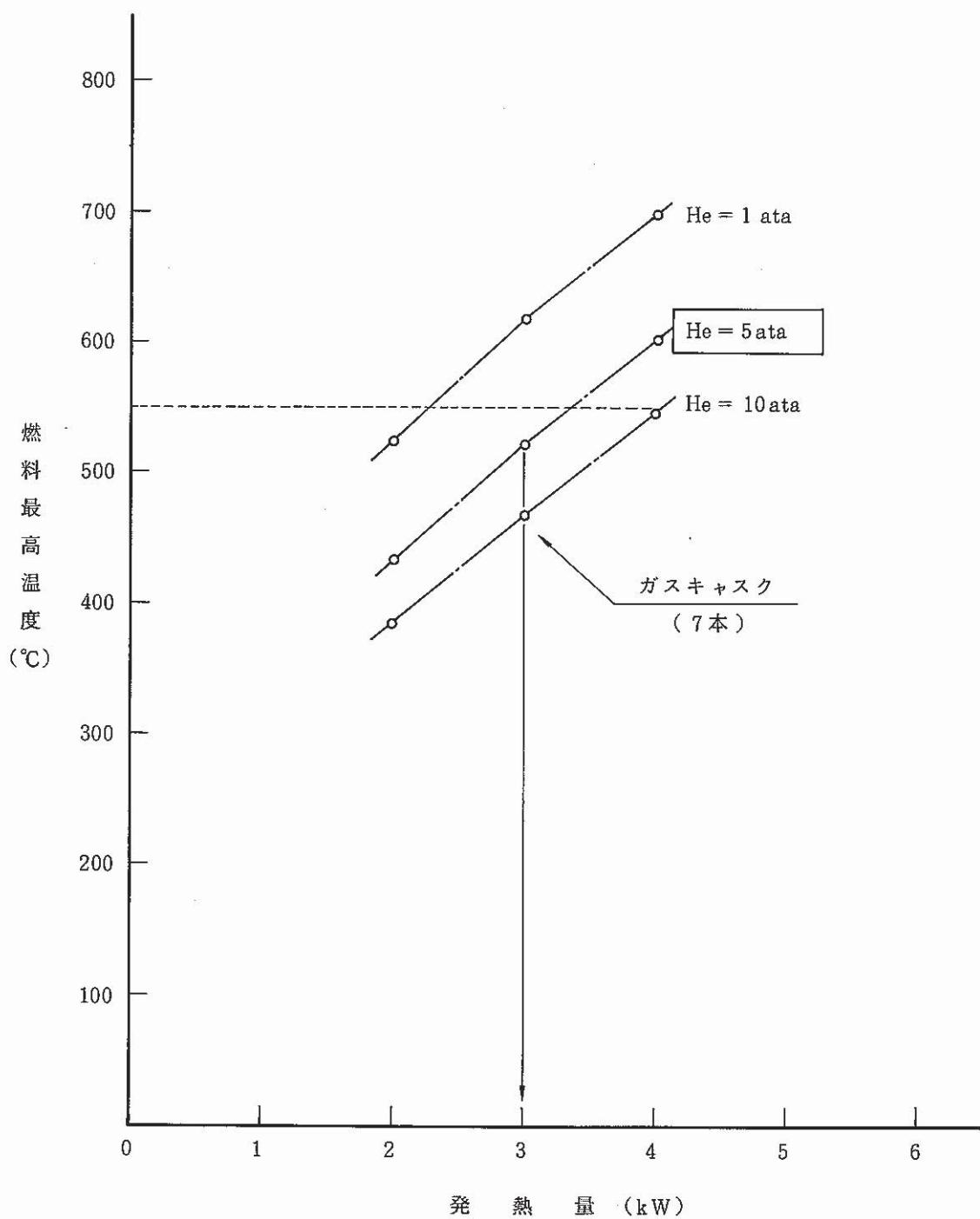


図 4.6-6 He ガス・アルミバスケットキャスク温度解析

| 原 子 炉 | | 停 止 | | | | 運 転 | | | | | |
|----------------------------|---------|-----|--------|---------|----|-----|--------|-----|-----|-----|---------|
| 炉停止後日数 | | 11 | 16 | 22 | 30 | 40 | 70 | 200 | 235 | 250 | 300 |
| 使 用 済 燃 料 I | 領 域 I | 燃交 | | | | | 強制通風冷却 | | | | 自然通風冷却 |
| | 領 域 II | 燃交 | | | | | 強制通風冷却 | | | | 自然通風冷却 |
| | 領 域 III | 燃交 | | | | | 強制通風冷却 | | | | 自然通風冷却 |
| | 領 域 IV | 燃交 | 自然通風冷却 | ガス缶詰・搬出 | | | | | | | ガス缶詰・搬出 |

| 原 子 炉 | | 停 止 | | | | 運 転 | | | | |
|----------------------------|---------|-----|-----|-----|-----|--------|---|---|---|---------|
| 炉停止後日数 | | 435 | 505 | 580 | 650 | △ | △ | △ | △ | |
| 使 用 済 燃 料 I | 領 域 I | | | | | 自然通風冷却 | | | | ガス缶詰・搬出 |
| | 領 域 II | | | | | 自然通風冷却 | | | | ガス缶詰・搬出 |
| | 領 域 III | | | | | | | | | |
| | 領 域 IV | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|---------|----|--------|---------|--|--|--|--|--|--------|
| 使 用 済 燃 料 II | 領 域 I | 燃交 | 強制通風冷却 | | | | | | | |
| | 領 域 II | 燃交 | 強制通風冷却 | | | | | | | 自然通風冷却 |
| | 領 域 III | 燃交 | 強制通風冷却 | | | | | | | 自然通風冷却 |
| | 領 域 IV | 燃交 | 自然通風冷却 | ガス缶詰・搬出 | | | | | | |

図 4.6-7 EVS 方式による燃料取扱計画

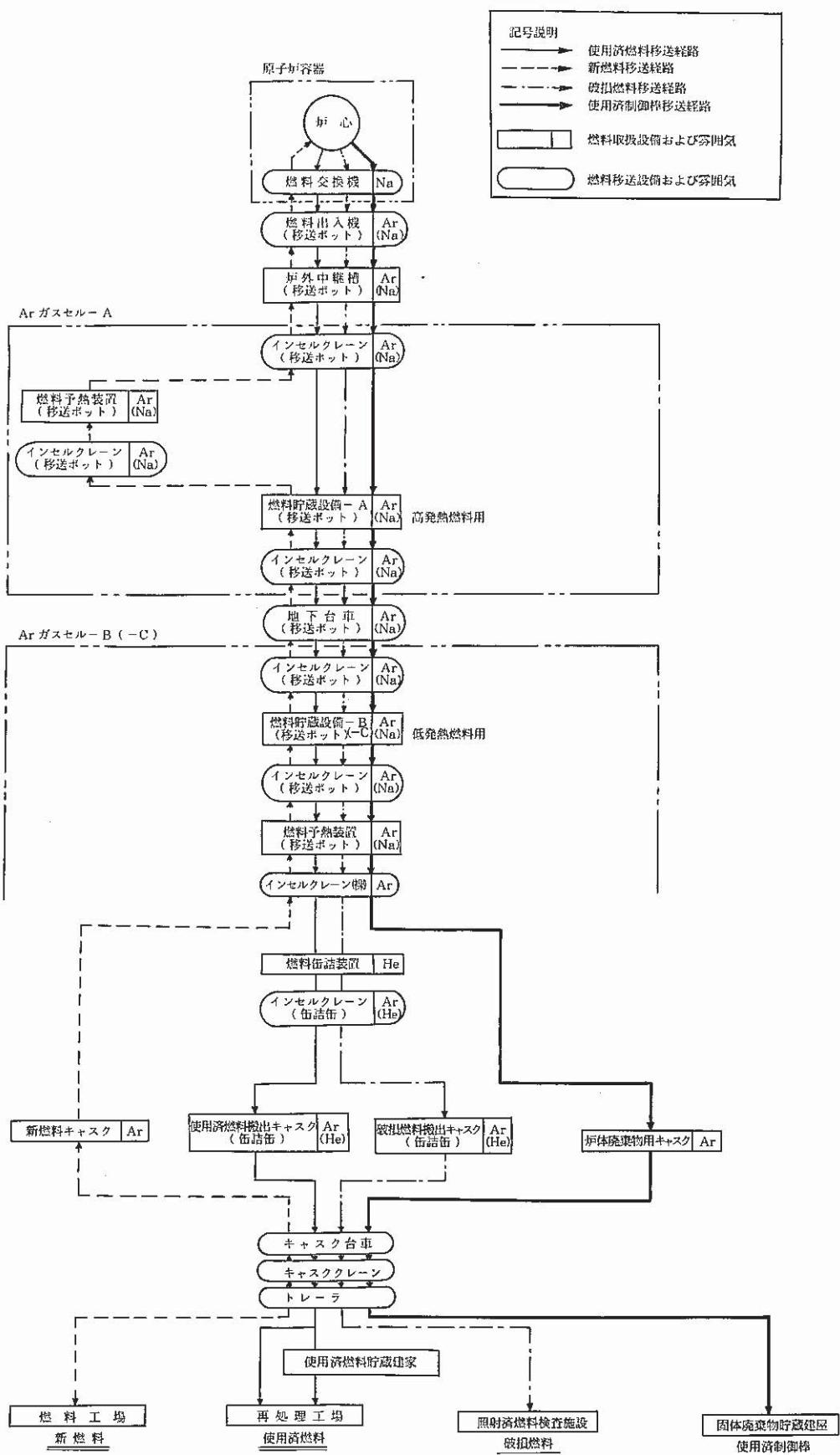


図 4.6-8 保持筒内貯蔵ナトリウムポット EVS 方式の燃料取扱系

4.7 EVS方式による燃料取扱系の設備設計

EVS方式による燃料取扱系として保持筒内貯蔵方式について、設備設計を実施した。

4.7.1 システム基本構成

図4.7-1に燃料取扱設備の系統構成図を示す。除熱性の検討から、高発熱の燃料については自然通風による除熱が困難であることが明らかになっていることから、高発熱燃料用の貯蔵設備については、保持筒外面の冷却用空気を強制的に流動させるものとした。また一定期間、高発熱燃料用貯蔵設備で冷却した燃料については自然通風により冷却する低発熱燃料用貯蔵設備に移送して貯蔵するものとし、高発熱燃料用とは独立に貯蔵設備を設け、それぞれを独立したArガスセルに設置する系統構成とした。

従って、高発熱燃料用貯蔵設備には冷却用空気を循環するプロワと、塵埃除去および塩分による構造材の腐食を防止するためのフィルタを設け、低発熱燃料用貯蔵設備には、フィルタのみを設けることとする。

また、低発熱燃料用貯蔵設備には、使用済燃料をガス缶詰にするための缶詰設備と、搬出のためのキャスクを接続する設備を設けた。

高発熱燃料用貯蔵設備と低発熱燃料用貯蔵設備は、地下台庫で接続し、燃料の受け渡しをする。

高発熱燃料用貯蔵設備、低発熱燃料用貯蔵設備とともに、新燃料の受け入れに際して、ポット内の凍結ナトリウムを融解するための予熱設備を設けてある。

表4.7-1に貯蔵設備の主要仕様を示す。

表 4.7-1 EVS 方式燃料取扱設備(保持筒内貯蔵方式)主要仕様

| 項目 | 主要仕様 | 項目 | 主要仕様 |
|------------------------------|--|---------------------------|--|
| (1) 系統構成 (2) 貯蔵設備仕様 型式 | 図 4.7-1 保持筒型 | (4) 冷却設備機器仕様 型式 | (高発熱燃料用) プロワ 基 数 |
| 基数 | 同 左 | 流体 | 3 (50% × 3) (自然通風) |
| 貯蔵容量 概略寸法 | 同 左 保持筒外径×長さ 298.5 × 5,200 貯蔵ピッチ 約 400 | 流量 | 遠心式 空 気 3,500 m ³ /分/基 |
| 概略重量 | 貯蔵設備設置スペース 高発熱燃料用 W 3,000 × L 12,000 低発熱燃料用 W 4,000 × L 9,000 480 T | 炉材 | ファイルタユニット 基 数 1 式 ユニットタイプ グラスウール |
| (3) 冷却設備系統仕様 型式 | (高発熱燃料用) 空 気 強制通風方式 | (低発熱燃料用) 空 気 自然通風方式 | 1 式 ユニットタイプ グラスウール |
| 除熱容量 (1体当たりの最高発热量) | 2.5 MW (20 kW) | 0.7 MW (5 kW) | |
| 冷却ガス風量 | 空気 4×10^5 kg/h | 空気 1×10^4 kg/h | |
| 貯蔵設備出入口 冷却ガス温度 | 32/70 °C | 32/270 °C | |

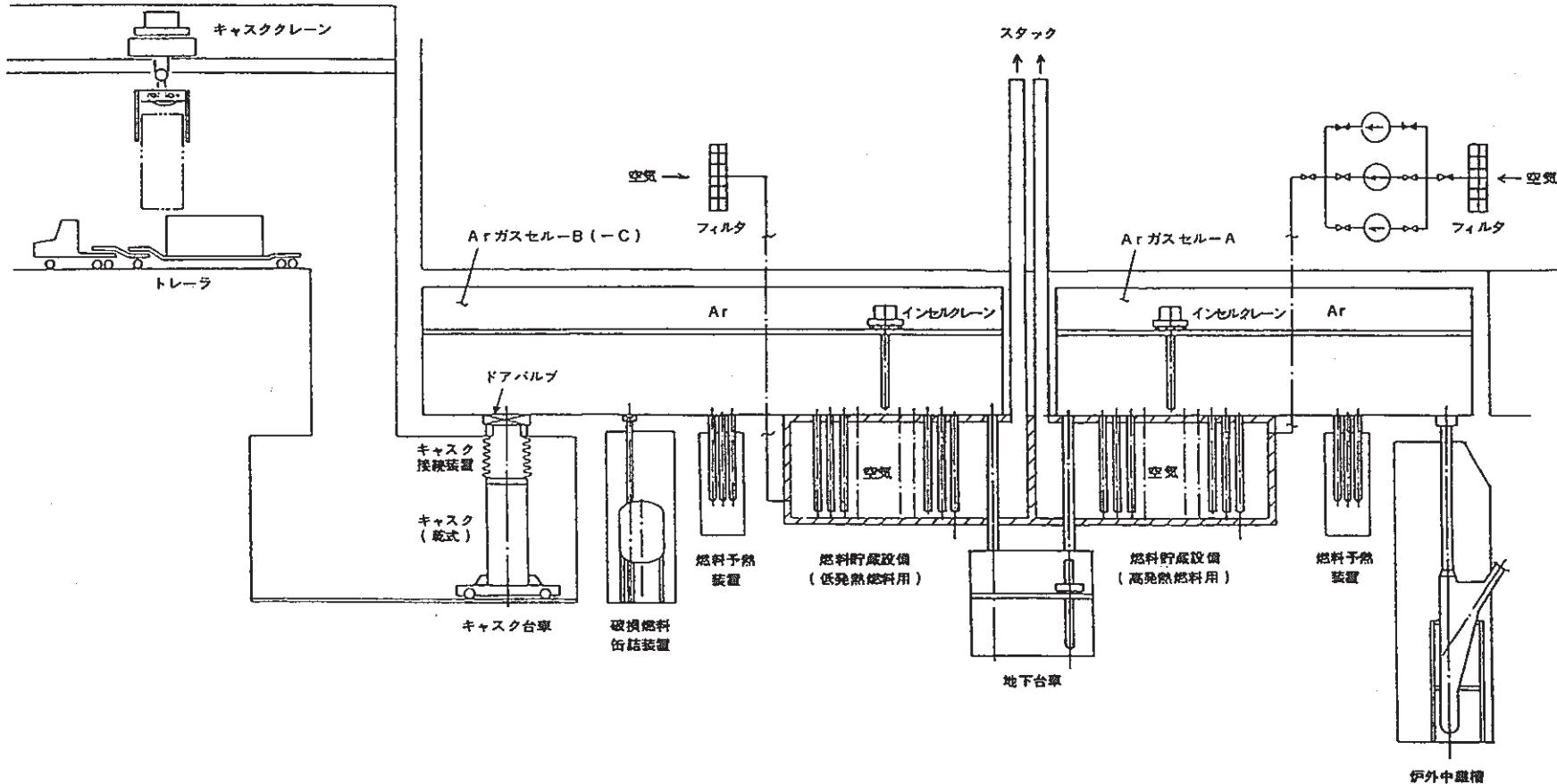


図 4.7-1 ナトリウムポット EVS 方式系統構成図
(保持筒内貯蔵方式)

4.7.2 基本配置計画

4.7.1 に示したシステム基本構成をもとに、保持筒内貯蔵方式による EVS 方式燃料取扱設備の基本配置計画を立案した。

(1) 前提条件

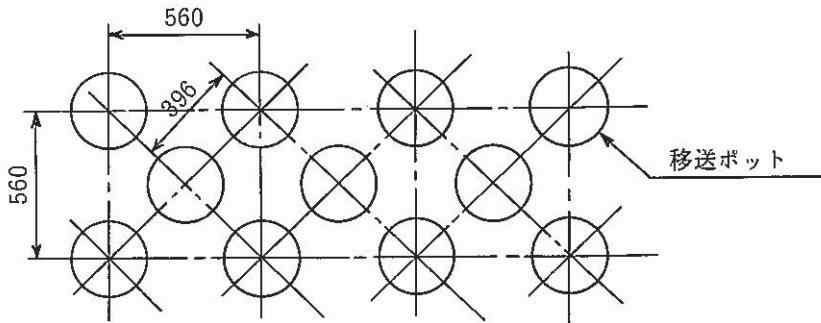
(i) 原子炉建家との取合

原子炉建家の配置は、昭和60年度要求技術設計研究(II)の配置を基本とし、冷却系機器の配置は固定し、燃取エリアのみを見直すものとした。

(ii) 貯蔵設備の容量及び貯蔵ピッチ

使用済燃料の貯蔵容量は 510 体（3 バッチ分）以上とし、その 1/3 の 170 体（1 バッチ分）をそれぞれ独立した貯蔵設備に貯蔵できる構成とするものとした。

貯蔵ピッチは未臨界性の検討結果より、350 mm 以上を確保するものとし、下図に示す格子状の配列とした。



(2) 配置計画

図 4.7-2 に基本的配置計画図を示す。

高発熱燃用貯蔵設備は炉外中継槽を介して原子炉容器との間で燃料をやりとりするため、原子炉容器側へ張り出し、1 次主冷却ポンプの間に配置されたセルー A 内に設置される。

低発熱燃料用貯蔵設備はセルー A の両側に隣接して設けられたセルー B 及び C に設備される。それぞれのセルは地下台車で接続されている。

使用済燃料の搬出及び新燃料の受入れは、セルー B のキャスク装荷ポートを介して行われる。

なお、燃料貯蔵計画上は、低発熱燃料貯蔵設備は 1 燃交バッチ分あればよいが、予備として 2 燃交バッチ分、即ち 2 つ設置した。これによってメンテナンスのために 1 つのセルを完全に空にすることが出来る。

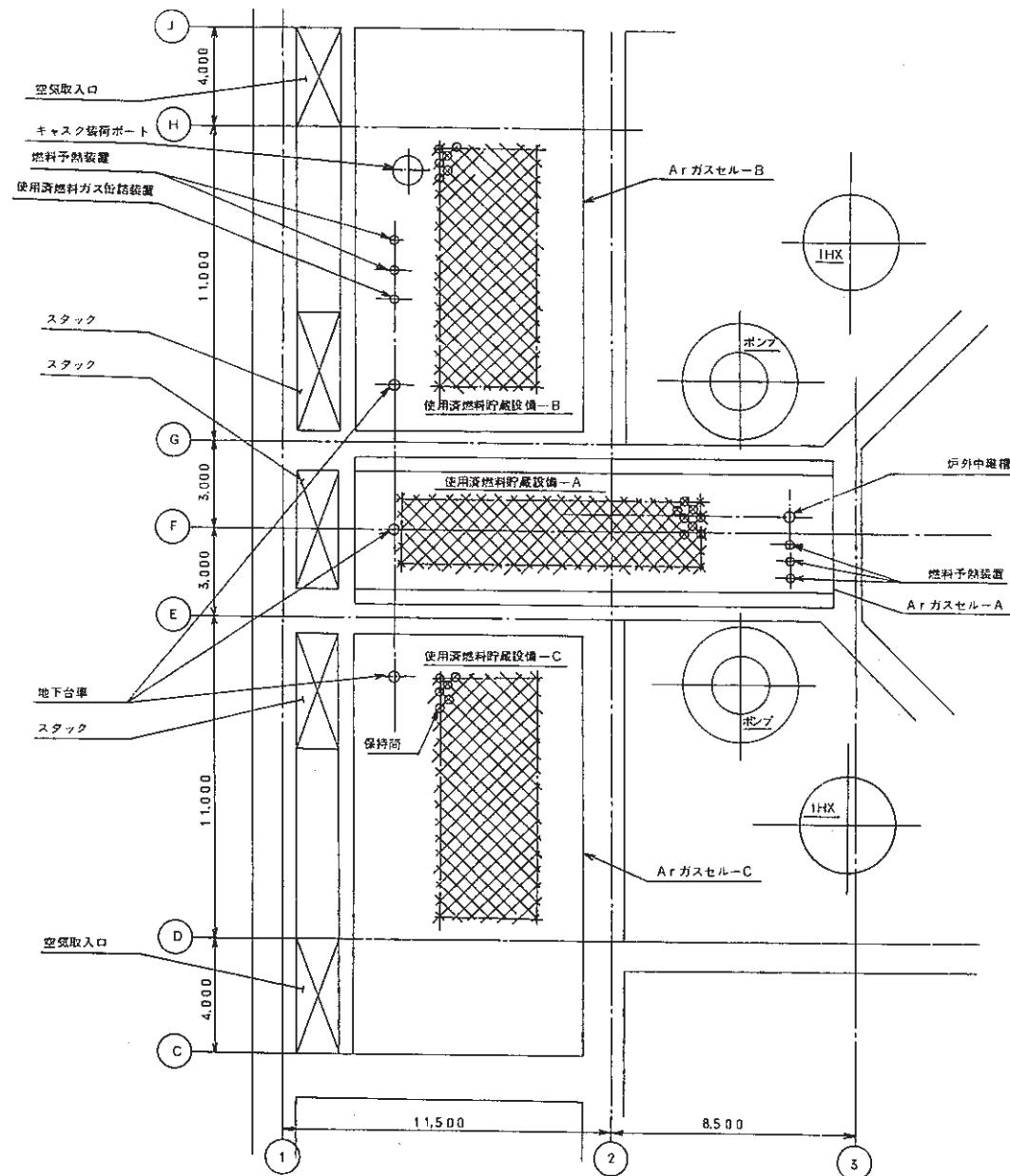


図 4.7-2 ナトリウムポット EVS 方式基本配置計画図
(保持筒内貯蔵方式)

4.7.3 燃料貯蔵設備

(1) 燃料貯蔵設備

図 4.7-3 に燃料貯蔵設備概念図（高発熱燃料用）を示す。

本貯蔵設備では使用済燃料はナトリウム入りのポットに収納されたままの状態で保持筒内に貯蔵される。保持筒 1 本につき 1 体の使用済燃料の貯蔵を行うため貯蔵本数にみあう数の保持筒を設ける。

使用済燃料の貯蔵容量は 510 体（3 バッチ分）とし、貯蔵ピッチは未臨界性、除熱性及び製作性を考慮して 396 mm とした。

貯蔵設備は炉外取出し直後の使用済燃料を貯蔵する高発熱燃料用貯蔵設備（燃料貯蔵設備 - A）とブランケット燃料及び一定期間高発熱燃料用貯蔵設備で冷却した発熱率 5 kW 以下の燃料を貯蔵する低発熱燃料用貯蔵設備（燃料貯蔵設備 - B 及び - C）の 3 分割とし、これに対応して Ar ガスセルも 3 部屋設け、各部屋に 1 組の貯蔵設備を配置する。各貯蔵設備には 1 バッチ分約 170 体の使用済燃料を貯蔵する。

使用済燃料の冷却は保持筒外面に空気を通風して行う。燃料貯蔵設備 - A は、プロワを用いた強制通風冷却とし、燃料貯蔵設備 - B, - C は自然通風冷却とする。

冷却用空気は燃料貯蔵設備の一端より入り、保持筒の間を通して反対の端のスタックへと流れる。

移送ポットを収納する保持筒は Ar ガスセル床下に吊り下げる形とした。Ar ガスセル床面には鋼板を設置し、保持筒上部と気密に接続して、保持筒外面の空気雰囲気と Ar ガスセル雰囲気を分離している。この鋼板は放射線遮蔽を兼ねる。

保持筒内面はブラッククロムメッキまたはクロムカーバイト爆発溶射を行い、熱ふく射率の改善を図っている。

保持筒下部は振れ止めの支持構造を設け、熱膨張による上下方向の伸びを逃がす構造とした。

保持筒プラグは図 4.7-2 中の断面詳細に示すように断熱部分を有し、使用済燃料から出る崩壊熱が上部へ伝わらないようにしている。また本プラグは保持筒だけでなく、移送ポット蓋の役目も果たす構造としている。

燃料貯蔵部出口の空気温度がコンクリートの許容温度 65°C を上まわること、及び保持筒よりのふく射による温度上昇が見込まれることから燃料貯蔵設備まわりのコンクリートの損傷を防ぐため、パーライトをコンクリートの上に施工し、断熱する。

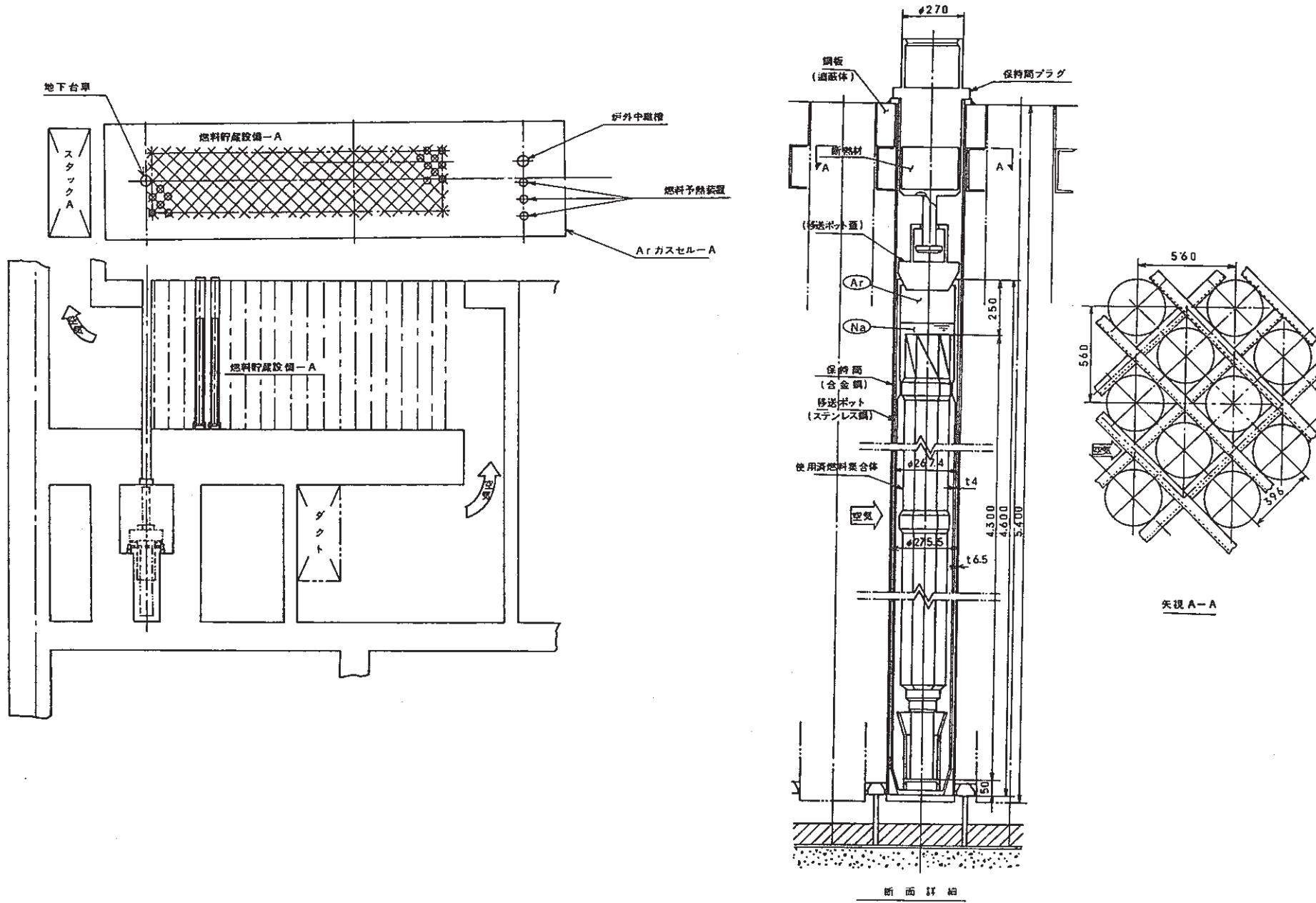


図 4.7-3 燃料貯蔵設備概念図

(2) 冷却設備

高発熱燃料用貯蔵設備の冷却はプロワーを用いた空気による強制通風により行い、低発熱燃料用貯蔵設備の冷却は自然通風により行う。

図 4.7-4 に燃料貯蔵設備冷却系系統図を示す。

(i) 燃料貯蔵設備 - A (強制通風方式)

プロワは50%容量のものを3台設置する。設置場所は図 4.7-12 に示すように FL-21 m とする。

冷却用空気は FL+14m に設置された空気取入口のフィルタを通ってプロワ室に入る。

プロワによって昇圧された空気はダクトに集められ、建家の一部をなす空気流路を通り、燃料貯蔵設備 - A に入る。

保持筒を冷却した空気は、燃料貯蔵設備の上部スタックより大気に放出される。

なお空気出入口ダクトには、ストリーミングを防止するためのベントを設けている。

(ii) 燃料貯蔵設備 - B 及び - C (自然通風方式)

冷却用の空気は FL+14m に設置された空気取入口のフィルタを通って、燃料貯蔵設備 - B (または - C) の一端より入り、保持筒からの熱により暖められて通風力を得て、反対の端のスタックへと流れ、大気へ放出される。本空気出入口にもストリーミング防止のためのベントを設けている。

(3) 設備仕様

(i) 貯蔵設備

表 4.7-2 に貯蔵設備の設備仕様を示す。

(ii) 冷却設備

表 4.7-3 に冷却設備の設備仕様を示す。

表 4.7-2 貯蔵設備・設備仕様

| 項 目 | 仕 様 | |
|----------------|---|---------|
| 型 式 | 保持筒方式燃料貯蔵設備 | |
| ◦ 使用済燃料貯蔵方式 | ナトリウム入移送ポット収納状態として貯蔵 | |
| ◦ 貯蔵設備の数及び貯蔵容量 | 3 { 高発熱燃料用 1 170 体 低発熱燃料用 2 340 体 | |
| ◦ 貯蔵対象及び発熱量 | | |
| • 高発熱燃料用 | 使用済炉心燃料 | 20 kW以下 |
| | 使用済制御棒 | — |
| | 新燃料 | — |
| • 低発熱燃料用 | 使用済炉心燃料 | 5 kW以下* |
| | 使用済ブランケット燃料 | 5 kW以下* |
| | (* 空気取入口のフィルタ有の場合) | |
| | 使用済制御棒 | — |
| | 移送ポット(空) | — |
| ◦ 貯蔵設備の寸法 | | |
| • 高発熱燃料用 | W 3.0 m × L 13.5 m × H 5.5 m (貯蔵設備 - A) | |
| • 低発熱燃料用 | W 4.5 m × L 12.0 m × H 5.5 m (貯蔵設備 - B) | |
| | W 4.5 m × L 13.0 m × H 5.5 m (貯蔵設備 - C) | |
| ◦ 保持筒寸法および材質 | $\phi 298.5 \times L 5.4 m$, 合金鋼 | |

表 4.7-3 冷却設備・設備仕様

| 項 目 | 仕 様 |
|-----------------------|---|
| ◦ 冷却方式 | |
| • 高発熱燃料用 | 保持筒外面強制通風方式 |
| • 低発熱燃料用 | 保持筒外面自然通風方式 |
| ◦ 冷却風量 | |
| • 高発熱燃料用 | $4 \times 10^5 \text{ kg/h}$ |
| • 低発熱燃料用 | $1 \times 10^4 \text{ kg/h}$ (最大、空気取入口フィルタ有の場合) |
| ◦ ブロワー (燃料貯蔵設備-A用) | |
| 型 式 | 遠心式 |
| 数 量 | 3基(2台常用、1台予備) |
| 容 量 | $3.500 \text{ m}^3/\text{分}/\text{基}$ |
| 電 動 機 | $250 \text{ kW}/\text{基}$ |
| 概略寸法 | L 6.0 m × W 2.9 m × H 3.6 m / 基 |
| ◦ フィルターユニット | |
| 型 式 | グラスペーパーフィルター式 |
| 容 量 | $750 \text{ m}^3/\text{分}/\text{基}$ |
| 数 量 | 9基(燃料貯蔵設備-A) 4基(燃料貯蔵設備-B, C各々2基) |
| 概略寸法 | W 3.0 m × L 2.2 m × H 2.0 m / 基 |

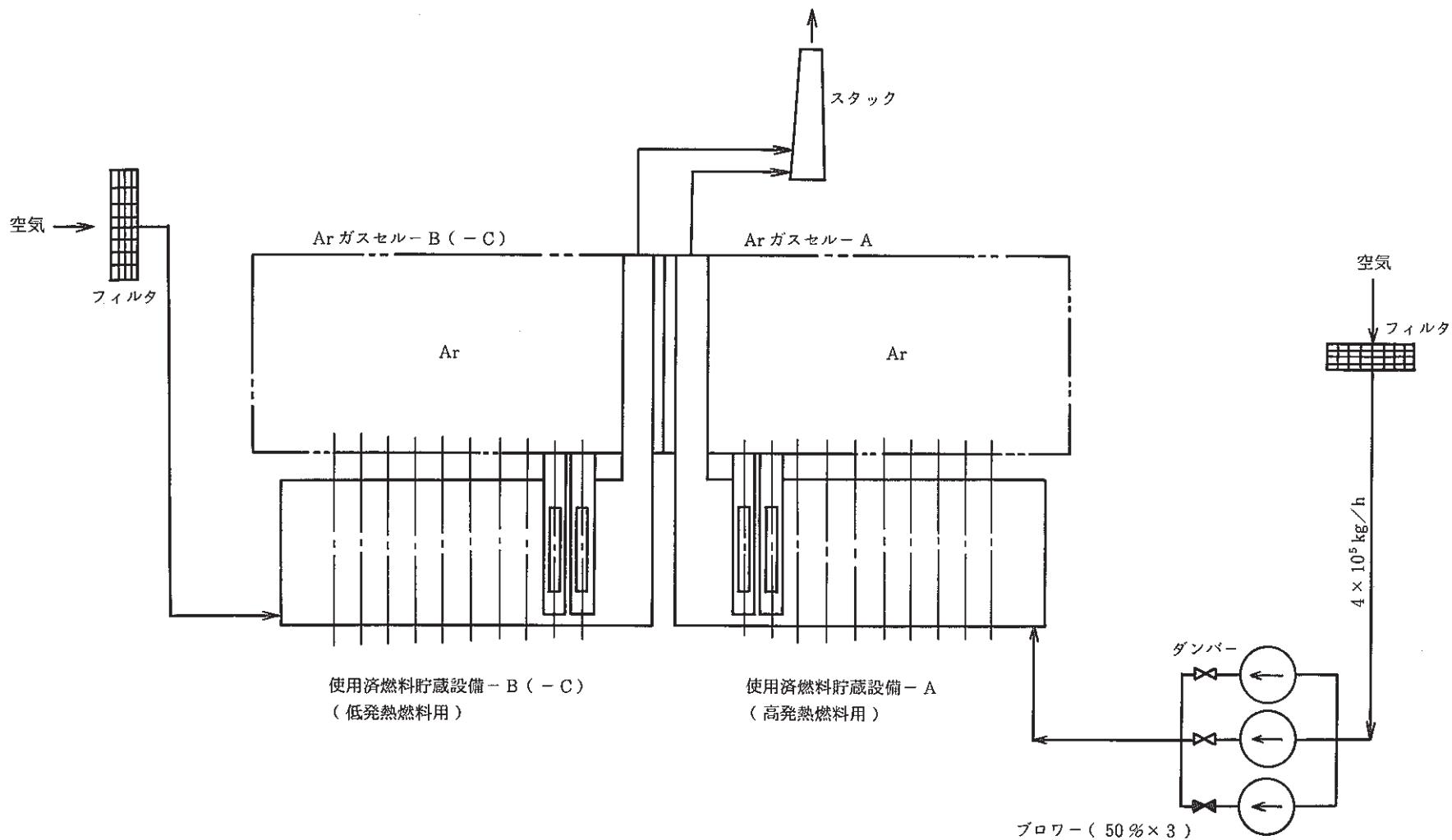


図 4.7-4 燃料貯蔵設備冷却系系統図

4.7.4 燃料貯蔵 Ar ガスセル内移送機

燃料貯蔵 Ar ガスセル内移送機（インセルクレーン）は各セル内で、移送ポット、ガス缶詰缶、裸燃料、保持筒プラグ等を移送する設備である。

インセルクレーンは所定の場所で把持した上記取扱対象物を Ar ガスセル内へ引き上げ、走行、横行動作によりそれぞれ所定の場所へ移動した後、取扱対象物を引き降ろす機能を持つ。

図 4.7-5 に燃料貯蔵 Ar ガスセル-A用インセルクレーンの概念図を示す。また表 4.7-4 にインセルクレーンの仕様を示す。

インセルクレーンは Ar ガスセルの長手方向にそって走行する走行台車、走行台車上を横行する横行台車および横行台車上に搭載されたグリッパ駆動部からなる。

走行台車は、セル上部の段付部に設けたレール上を走行する。走行は、セル外部に設けた電動機により駆動されるチェーンにより行われ、電動機の故障が生じた場合でも手動により駆動させることができ。横行台車は、駆動用の電動機が搭載されており 走行台車上を自走できる。電動機の故障が生じた場合は、走行台車にて特定の位置（炉外中継槽または地下台車）へ移行させることにより、手動による操作が可能となる設計としている。

グリッパはチェーンにより吊り下げられており、横行台車上に搭載されたグリッパ駆動装置により昇降および開閉される。グリッパは取扱対象を落下させることのないよう十分な強度と、誤作動がおこらない構造とする。グリッパの昇降は速度可変型とし取扱対象を所定の位置で着床される際は低速で運転することにより、取扱対象に衝撃荷重がかからないようにする。

インセルクレーンには、移送中の取扱対象物の揺れを防止するため案内管を設け、取扱対象物は案内管に収納された状態で移送するものとする。案内管はインセルクレーンがトリップした場合に、燃料の冷却が可能となるよう上部に開孔部を設け、自然循環流路を形成できるようになるとともに、内外面をブラッククロムメッキまたはクロムカーバイト爆発溶射を行い、熱放射率の改善をはかるものとした。

燃料貯蔵 Ar ガスセル-B 及びC用インセルクレーンは基本的にはセル-A用と同一のインセルクレーンを用いることができる。ただしセルの巾、セル内機器の配列の関係から、横行ストローク及び移送台車のスパンが異なる。

またセル-B用インセルクレーンは移送ポット入りの燃料に加えガス缶詰缶裸燃料等も取扱うため、グリッパ先端を交換することにより、どれでも取扱えるようにしている。図 4.7-6 にセル-B用インセルクレーンのグリッパ部の概念図を示す。

表 4.7-4 インセルクレーンの仕様

| 項目 | 仕様 |
|--------------|-------------------------------|
| ◦型式 | 横行走行式長ストロークインセルクレーン |
| ◦取扱対象 | 移送ポット入燃料集合体及び裸燃料集合体 |
| ◦移送ポット取扱方法 | グリッパ把持方式 |
| ◦移送ポット姿勢 | 案内管内直立 |
| ◦最大昇降重量 | 1.7 T |
| ◦移送ポット昇降方式 | グリッパ昇降用チェーン巻き揚げ |
| ◦グリッパ昇降速度 | 高速 15 m/分, 低速 1.5 m/分 |
| ◦グリッパ昇降ストローク | 17 m |
| ◦横行走行方式 | 横行 スクリューナット方式 走行 チェーンけん引方式 |
| ◦横行速度 | 高速 15 m/分, 低速 1.5 m/分 |
| ◦作動雰囲気 | Arガス, 温度 55 °C以下 |
| ◦駆動装置出力 | |
| ◦昇降用モーター | 5.5 kW |
| ◦横行用モーター | 3.7 kW |
| ◦移行用モーター | 7.5 kW |
| ◦主要部材質 | |
| ◦グリッパ, 案内管 | ステンレス鋼 |
| ◦その他構造材 | 炭素鋼 |

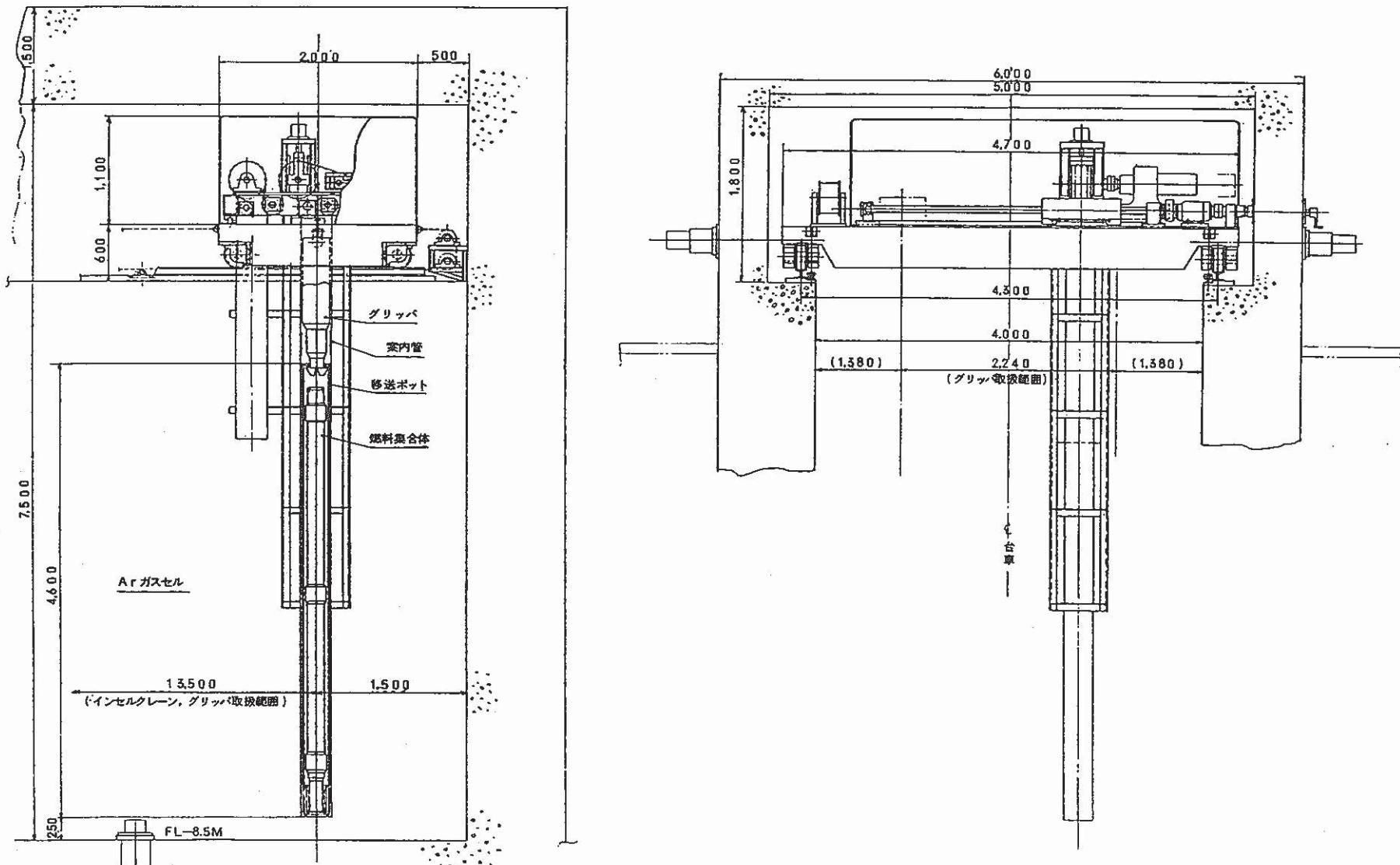


図 4.7-5 燃料貯蔵 Ar ガスセル内移送機(インセルクレーン)概念図
(Ar ガスセルー A 用)

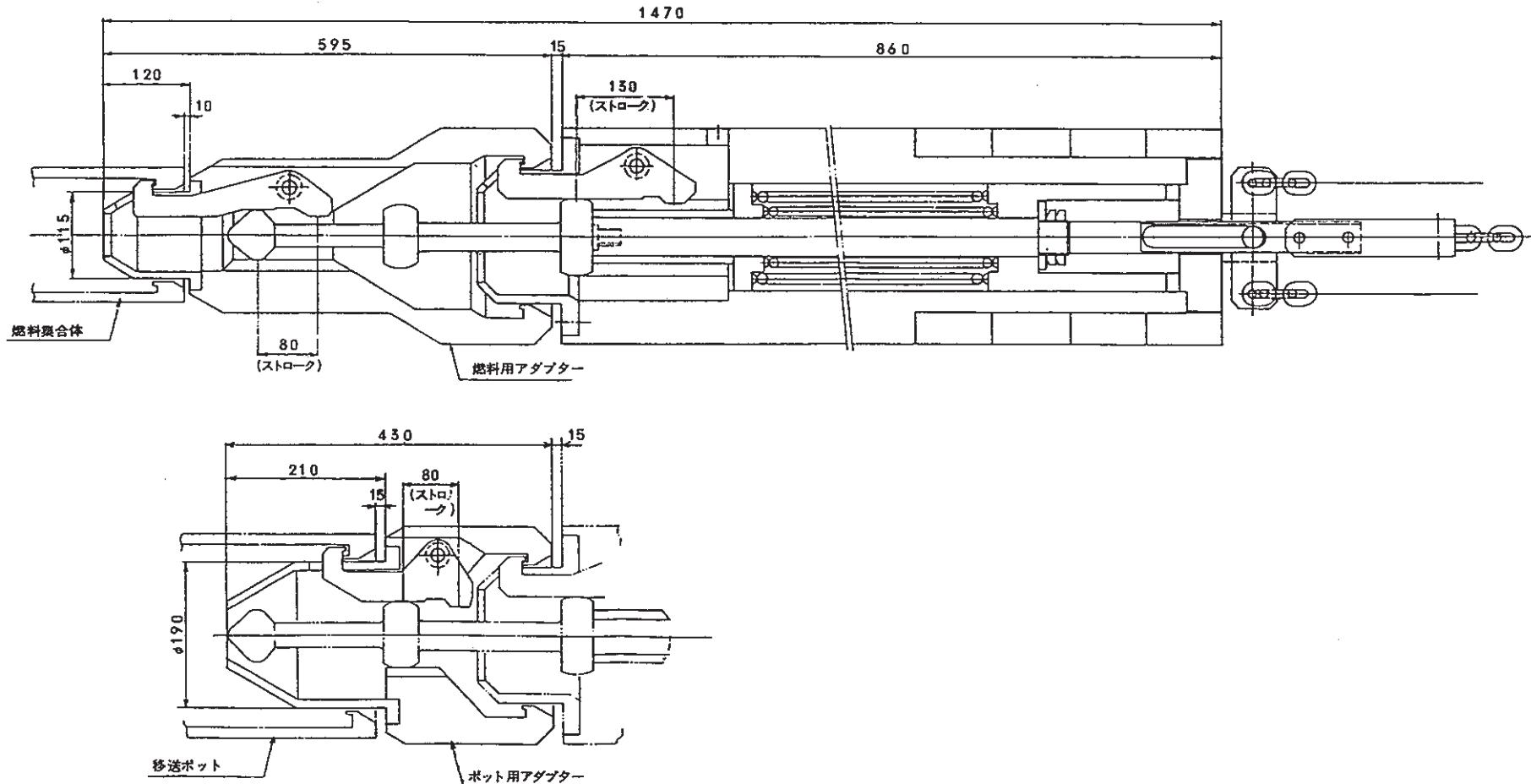


図 4.7-6 燃料貯蔵用移送機（インセルクレーン）

ポート用及び燃料用アダプター概念図

4.7.5 Ar ガスセル霧囲気調整設備

Ar ガスセル霧囲気調整設備は、セル内をアルゴンガス霧囲気に維持するとともに圧力を一定に保つための圧力調整系と、セル内の燃料、機器、照明等からの放散熱を除去し、セル内霧囲気温度を一定の範囲に保つための冷却系から構成される。

除熱能力に関しては、A, B, C各セル共通の放散熱として、貯蔵設備 60 kW, 照明 20 kW, 機器 2 kW を考慮し、更に移送中の燃料からの放散熱としてセル-A は 20 kW, セル-B, -C は、12 kW を加え総除熱量を 290 kW とした。冷却系のヒートマスバランスを図 4.7-7 に示す。

系統はアルゴンガス再循環方式とし、循環ファン、冷却器、フィルタダクト及び弁で構成する。放散熱量の相違に応じて各セルへ冷却アルゴンガスを配分するために、セル入口ダクトに流量調節弁を設置した。

冷却器はフィンチューブ方式とし、系統削減のために伝熱管内冷媒としてチラー水を用いるものとする。また伝熱管破損時にセル内に水分が混入するのを防止するため、2重管式の伝熱管を用いるものとする。

また、セル内で発生するナトリウムミストを除去するために冷却系にフィルタを設置する。外部電源喪失時でも燃料の健全性を保つため、50% × 3 系統の非常系設備とする。

セル内で燃料が破損した場合、環境への FP ガスの漏洩量を被曝制限値以下に抑えるために、セル内霧囲気を 300 回/day の割合で循環し、よう素を除去する必要があり、そのために冷却系にはよう素フィルタを設置する。

よう素除去フィルタは 3 セルで 1 ユニットを共有するものとし、フィルタの交換が可能な構造とした。また、セルを 300 回/day の割合でガス循環するために必要な流量 $1.3 \times 10^4 \text{ kg/h}$ は、冷却系の循環流量 $6.1 \times 10^4 \text{ kg/h}$ に比べて少ないため、フィルタ物量削減のためにフィルタを冷却系からバイパスさせて設置し流量調節弁にてフィルタ通過風量を制御するものとした。

Ar ガスセル霧囲気調整設備の基本系統図を図 4.7-8 に、基本仕様を表 4.7-5 に、機器仕様を表 4.7-6 にそれぞれ示す。

表 4.7-5 Ar ガスセル雰囲気調整設備系統仕様

| 項 目 | 仕 様 |
|---------------|--|
| (1) 冷却系 | |
| 系統数 | 50 % × 3 系統 |
| 除熱容量 | 290 kW : 通常燃交時 |
| 循環風量 | $6.1 \times 10^4 \text{ kg/h}$ |
| 温度(セル入口／出口) | 22 °C / 55 °C |
| セル内圧力 | 300 ± 70 mm Aq |
| 系統圧損 | 200 mm Aq 以下 |
| ダクト口径 | $\phi 600 \text{ mm}, \phi 813 \text{ mm}$ |
| ダクト材質 | 炭素鋼 |
| 冷却水流量 | 44 T/h / 系統 |
| 冷却水温度 | 5 °C / 8 °C |
| (冷却器入口／出口) | |
| よう素除去フィルタ通過風量 | $1.3 \times 10^4 \text{ kg/h}$ |
| (2) 圧力調整系 | |
| 圧力調整方式 | 給・排気方式 |
| 設定圧力 | 300 ± 70 mm Aq |
| 給気量(最大) | 120 N m³/h |
| 排気量(最大) | 20 N m³/h |

表 4.7-6 Ar ガスセル雰囲気調整設備機器仕様

| 項 目 | 仕 様 |
|---------------|---|
| (1) 循環ファン | |
| 数　量 | 3 基 |
| 型　式 | 遠心式 |
| 流　量 | 310 m³/分/基 |
| 電動機容量 | 18.5 kW/基 |
| 概略寸法 | L 2.1 m × W 1.6 m × H 1.7 m/基 |
| (2) 冷却器 | |
| 数　量 | 3 基 |
| 型　式 | 2重伝熱管フィンチューブ式 |
| 冷却容量 | 155 kW/基 |
| 流　体 | 管外：Ar 管内：冷却水 |
| 流　量 | 管外：310 m³/分/基 管内：44 T/h/基 |
| 概略寸法 | L 1.5 m × W 1 m × H 1.5 m |
| (3) ナトリウム | |
| ミストフィルタ | |
| 数　量 | 3 基 |
| 型　式 | ユニットタイプ |
| フィルタ構成 | ナトリウムミスト除去用：1段 塵埃除去用　　：1段 |
| 炉　材 | ナトリウムミスト除去用：ステンレスファイバ 塵埃除去用　　：グラスウール |
| 通過風量 | 310 m³/分/基 |
| 概略寸法 | L 5 m × W 1.5 m × H 1.5 m |
| (4) よう素除去フィルタ | |
| 数　量 | 1 式 |
| 型　式 | ユニットタイプ |
| フィルタ構成 | よう素除去用：1段 塵埃除去用　　：3段 |
| 炉　材 | よう素除去用：活性炭 塵埃除去用　　：グラスウール |
| 通過風量 | 140 m³/分 |
| 概略寸法 | L 4.3 m × W 1 m × H 2.6 m |

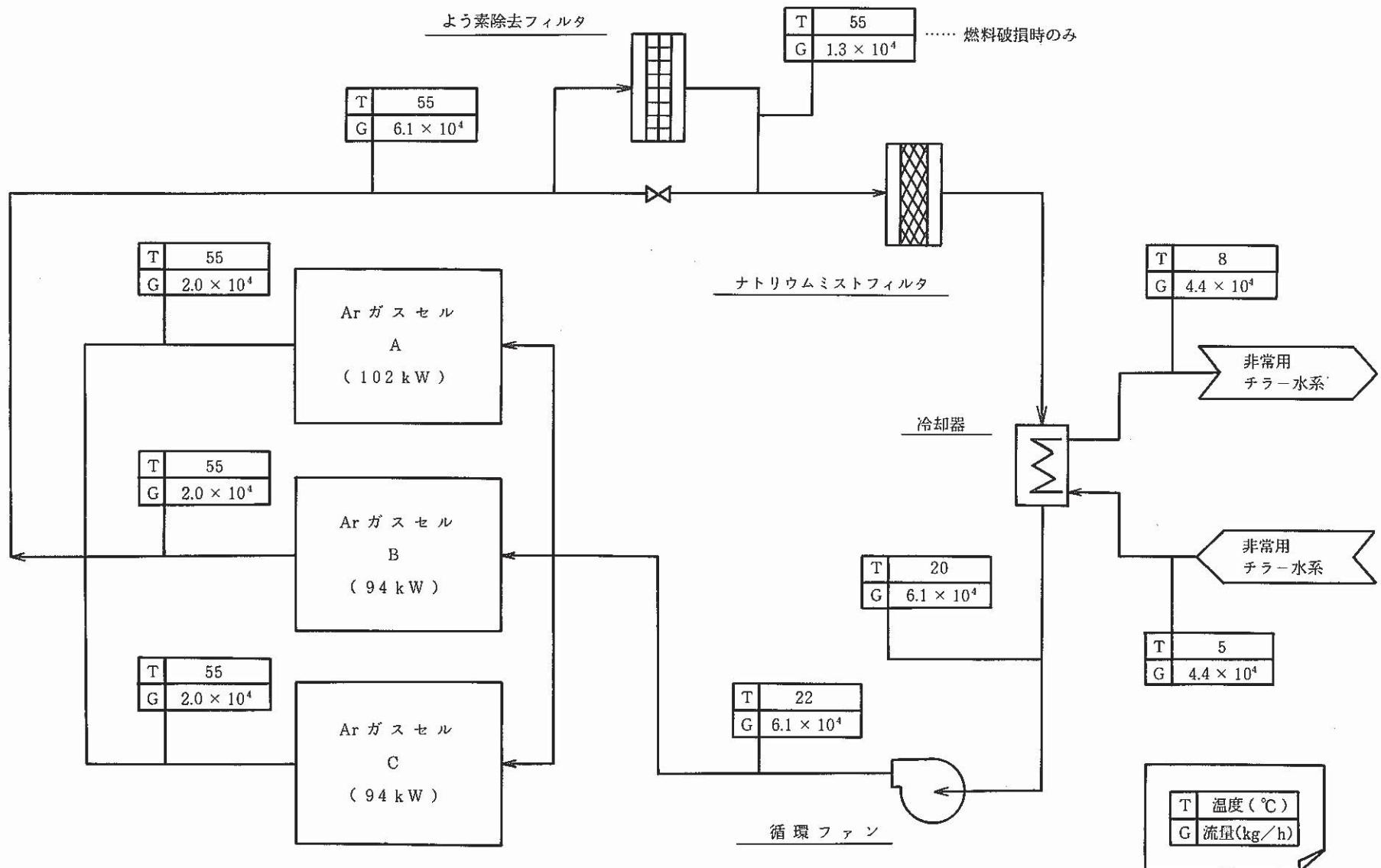
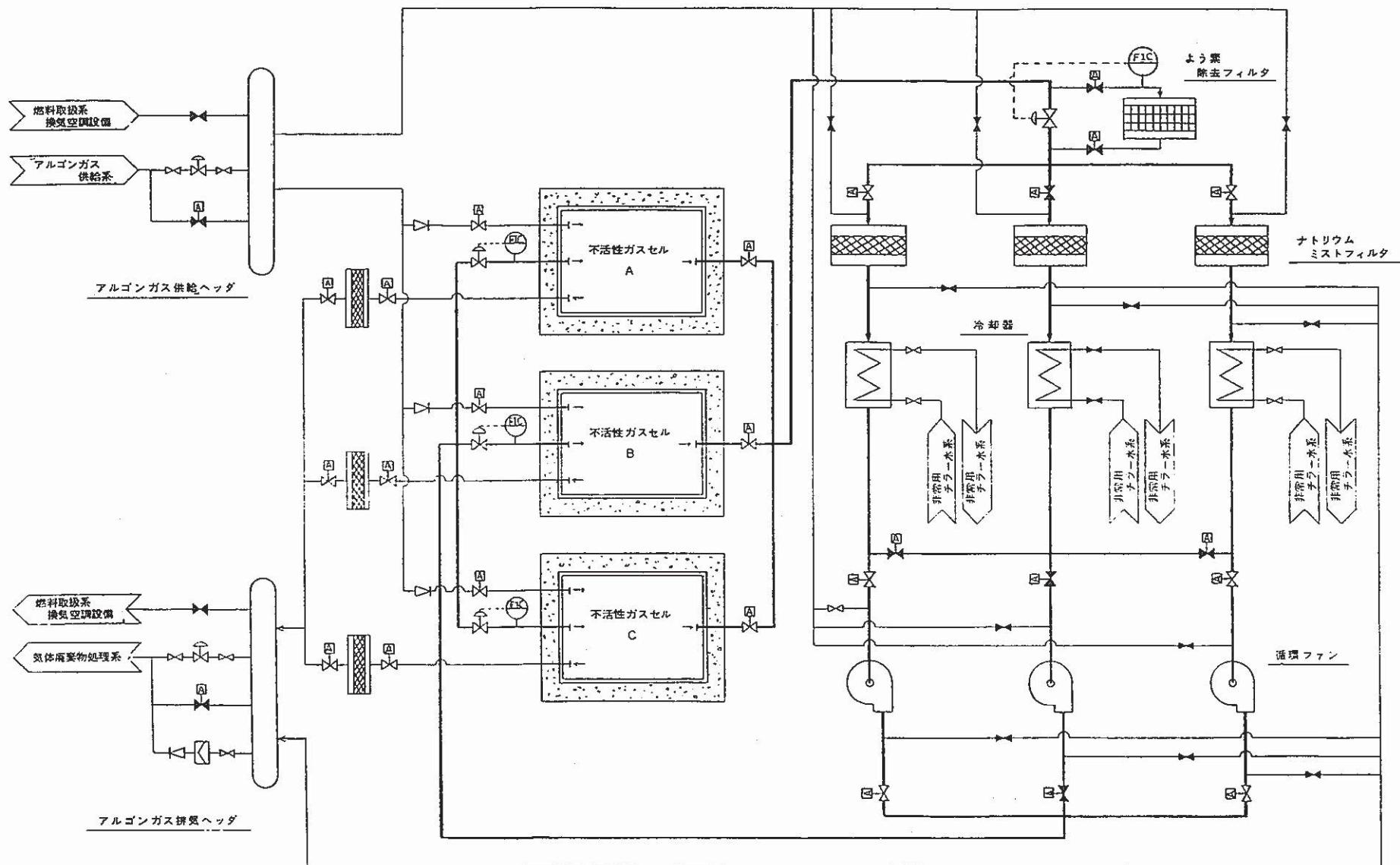


図 4.7-7 Ar ガスセル霧囲気調整設備ヒートマスバランス



4.7.6 燃料貯蔵 Ar ガスセルドアバルブ

燃料貯蔵 Ar ガスセルドアバルブは、Ar ガスセルのキャスク装荷ポートに取付けられ、キャスクに燃料を装荷する際に Ar ガスセル雰囲気とキャスク内の雰囲気を周囲の空気雰囲気と気密に接続する装置であり、ドアバルブ本体及びキャスク接続装置よりなる。

ドアバルブ本体は、燃料交換時および使用済燃料貯蔵時に Ar ガスセルのバウンダリを形成し、そのシール部を総て 2 重にして、一方のシールが損傷しても Ar ガスのセル外への漏洩または空気の Ar ガスセルへの混入のない構造とする。

図 4.7-9 に燃料貯蔵 Ar ガスセルドアバルブ概念図を示す。表 4.7-7 にドアバルブ本体の仕様を示す。

ドアバルブの開閉は電動機により駆動するボルスクリューにより行われる。ドアバルブには 4 つの車輪と 4 つの横ゆれ防止車輪が付いており、開閉は円滑に行われる。

閉止時はドアバルブ本体が上下のシール部に押し付けられる形となって、気密が保たれる。ドアバルブ外周には鉛の遮蔽体を備え、Ar ガスセル中で燃料を取扱っている場合や、キャスクへ使用済燃料を装荷する場合でも、ドアバルブ下部及び周辺の線量率が輸送容器の基準を満たすものとする。

キャスク接続装置は、Ar ガスセルとキャスクを接続した際にバウンダリを形成するものとし、ドアバルブ本体と同様にシール部は 2 重構造とする。

図 4.7-9 の燃料貯蔵 Ar ガスセルドアバルブ概念図中にキャスク接続装置を示す。表 4.7-8 にキャスク接続装置の仕様を示す。

キャスク接続装置には油圧昇降式の可動ブロック、可動ブロック落下防止フック、可動ブロックの昇降時の気密を保つためのベローズおよび、キャスクの接続、切りはなし時におけるキャスク接続装置のガス置換のための吸排気ラインが取り付けられている。

表 4.7-7 ドアバルブ本体仕様

| 項 目 | 仕 様 |
|--------|--------------|
| ◦型式 | 遮蔽付ゲート弁 |
| ◦口径 | ϕ 1,200 |
| ◦主要部材質 | |
| •構造材 | ステンレス鋼および炭素鋼 |
| •遮蔽体 | 鉛 |
| ◦駆動方式 | 電動式 1.5 kW |
| ◦開閉速度 | 750 mm/分 |

表 4.7-8 キャスク接続装置仕様

| 項 目 | 仕 様 |
|----------------|--------------|
| ◦型式 | 可動ブロック昇降式 |
| ◦口径 | ϕ 1,200 |
| ◦主要部材質 | |
| •構造材 | ステンレス鋼および炭素鋼 |
| •遮蔽体 | 鉛 |
| ◦可動ブロック昇降駆動方式 | 油圧昇降式 |
| ◦可動ブロック昇降速度 | 200 mm/分 |
| ◦可動ブロック昇降ストローク | 300 mm |

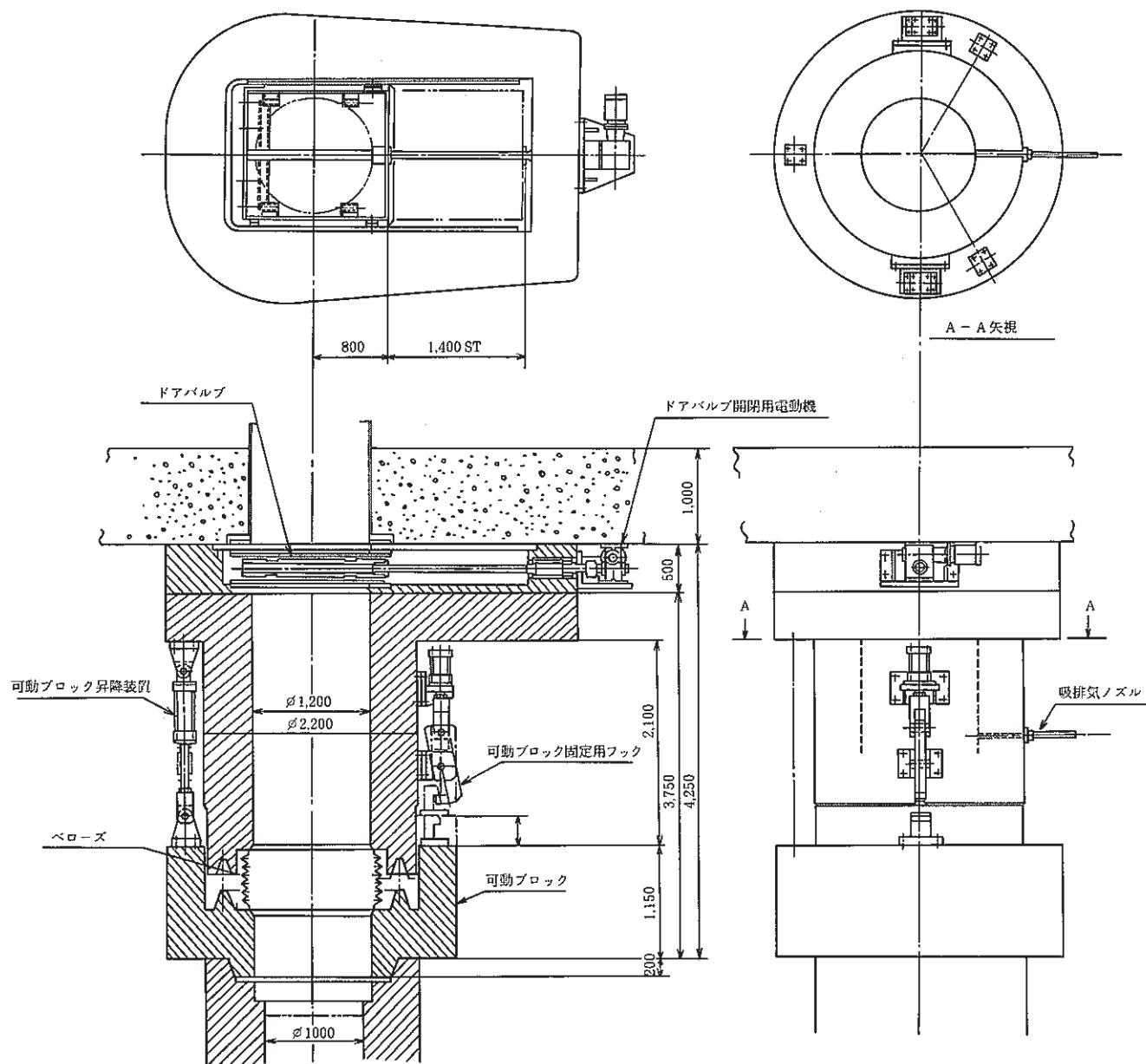


図 4.7-9 燃料貯蔵 Ar ガスセルドアバルブ概念図
(含キャスク接続装置)

4.7.7 キャスク移送台車

キャスク移送台車は使用済燃料搬出用キャスク、新燃料移送キャスク、破損燃料取扱キャスクを搭載し、キャスク取扱エリアとキャスク装荷ポート間を移動する台車である。

図4.7-10にキャスク移送台車概念図を示す。表4.7-9にキャスク移送台車の仕様を示す。

キャスク移送台車は、キャスク固定装置と走行台車とからなる。

キャスク移送台車は、レール上を走行する軌上案内式走行台車である。走行はキャスク移送台車通路の両端外部に設けた電動機により駆動されるチェーンにより行われる。

キャスク移送台車の中央には、使用済燃料搬出用キャスクトラニオンの受けが設けられており、キャスクの荷重を受けている。

また、キャスク上部の2点を油圧シリンダーにより固定し、キャスクの転倒を防止している油圧シリンダー用の油圧ユニットが移送台車に搭載されている。

以上の動作は全て遠隔・自動で行われる。

表 4.7-9 キャスク移送台車仕様

| 項 目 | 仕 様 |
|-------------|--------------------------|
| ・型式 | 軌上案内式走行台車 |
| ・キャスク移送姿勢 | 直立 |
| ・搭載重量 | 110 T |
| ・走行速度 | 5 m／分 |
| ・走行距離 | 約 15 m |
| ・移送モーター | 15 kW |
| ・キャスク転倒防止方法 | 油圧シリンダーによるキャスク上部 2点固定 |
| ・材質 | 炭素鋼 |

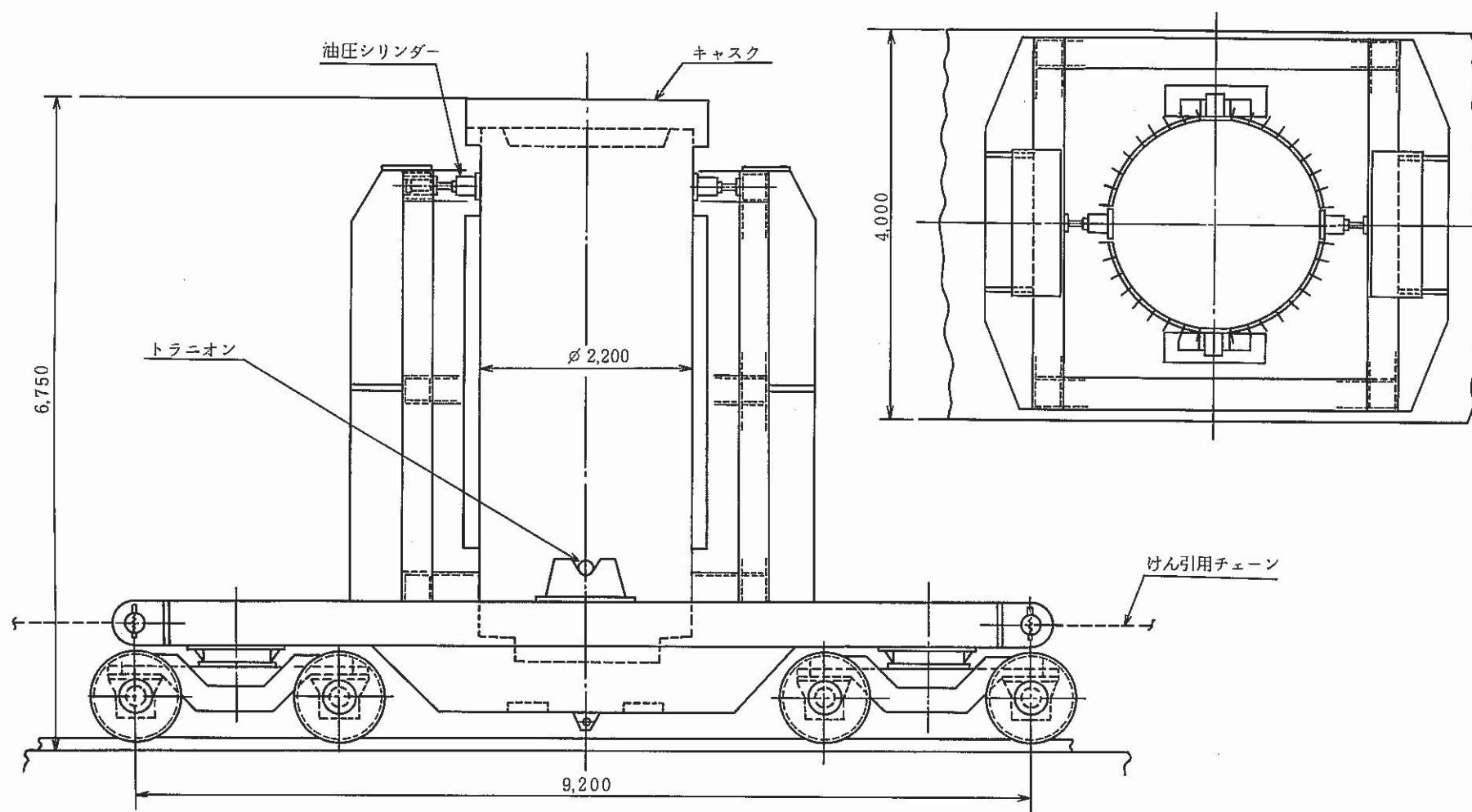


図4.7-10 キャスク移送台車概念図

4.7.8 地下台車

地下台車は3分割されたセル間の燃料の移送に用いる。地下台車で移送される燃料は、移送ポットに入れられた状態で取扱われる。

図4.7-11に地下台車概念図を示す。表4.7-10に仕様を示す。

地下台車は移送ポットを収納保持する収納用保持管と走行台車とからなる。

走行台車はArガスセル雰囲気の地下通路内に設けたレールを走行する。走行は地下通路の両端外部に設けた電動機により駆動させるチェーンにより行われる。電動機が故障した場合でも手動により駆動できる設備を備えている。

収納用保持管には上部、下部にガスが流通できるように通風孔を設け、移送ポットのArガスにより冷却が可能な構造としている。

また、収納用保持管は内外面をブラッククロムメッキまたは、クロムカーバイド爆発溶射を行い、放射率の改善をはかるものとした。

表 4.7-10 地下台車仕様

| 項目 | 仕様 |
|------------|-----------|
| ・型式 | 軌上案内式走行台車 |
| ・移送ポット移送姿勢 | 直立 |
| ・搭載重量 | 0.9 T |
| ・走行方式 | チェーンけん引方式 |
| ・走行速度 | 6 m/分 |
| ・走行範囲 | Ar ガスセル間 |
| ・走行距離 | 13 m |
| ・移送用モーター | 2.2 kW |

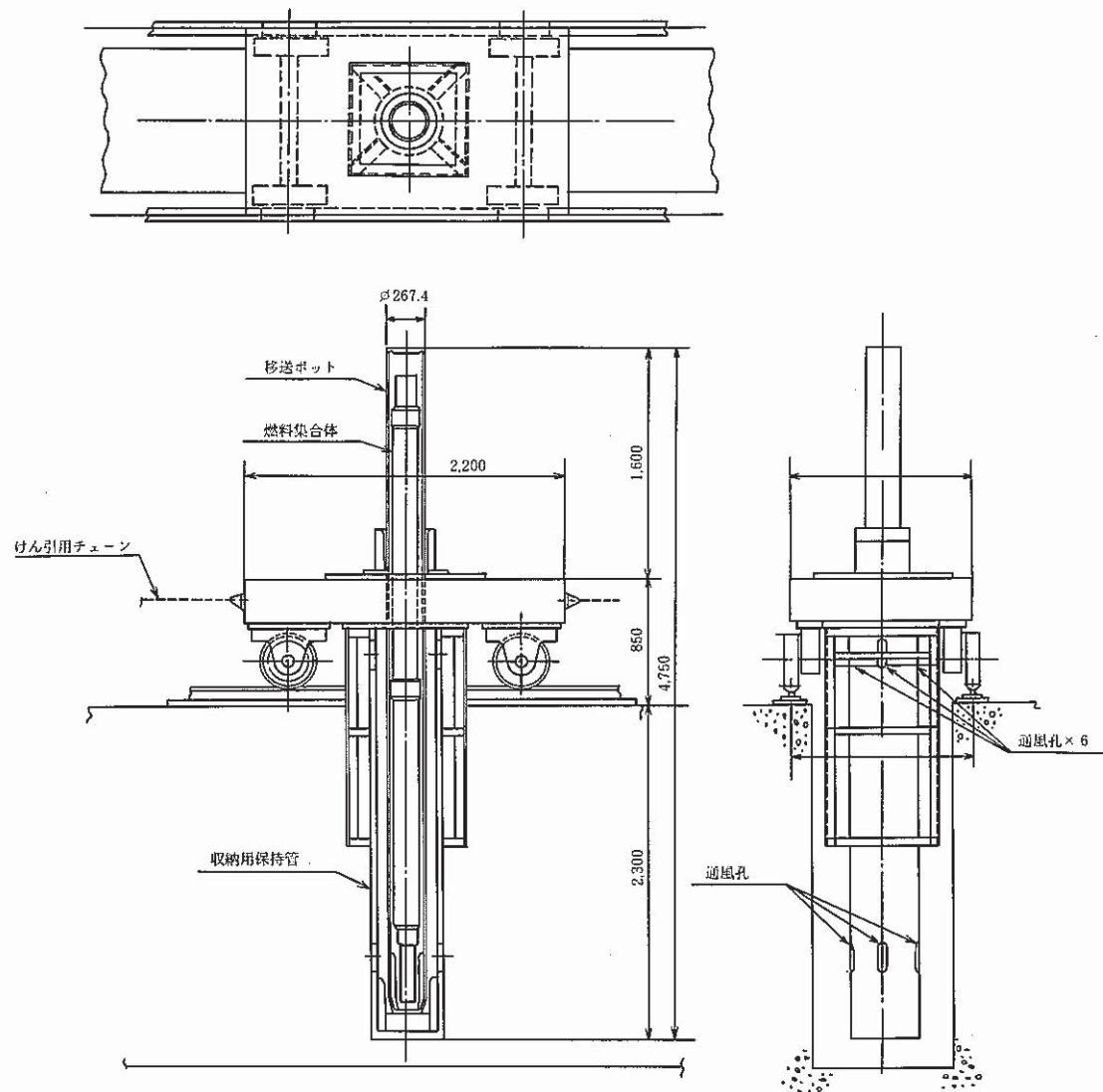


図4.7-11 地下台車概念図

4.7.9 燃料取扱設備全体配置計画

燃料取扱設備の原子炉建物の各レベルにおける配置計画を行い、図4.6-12～図4.7～16に示した。

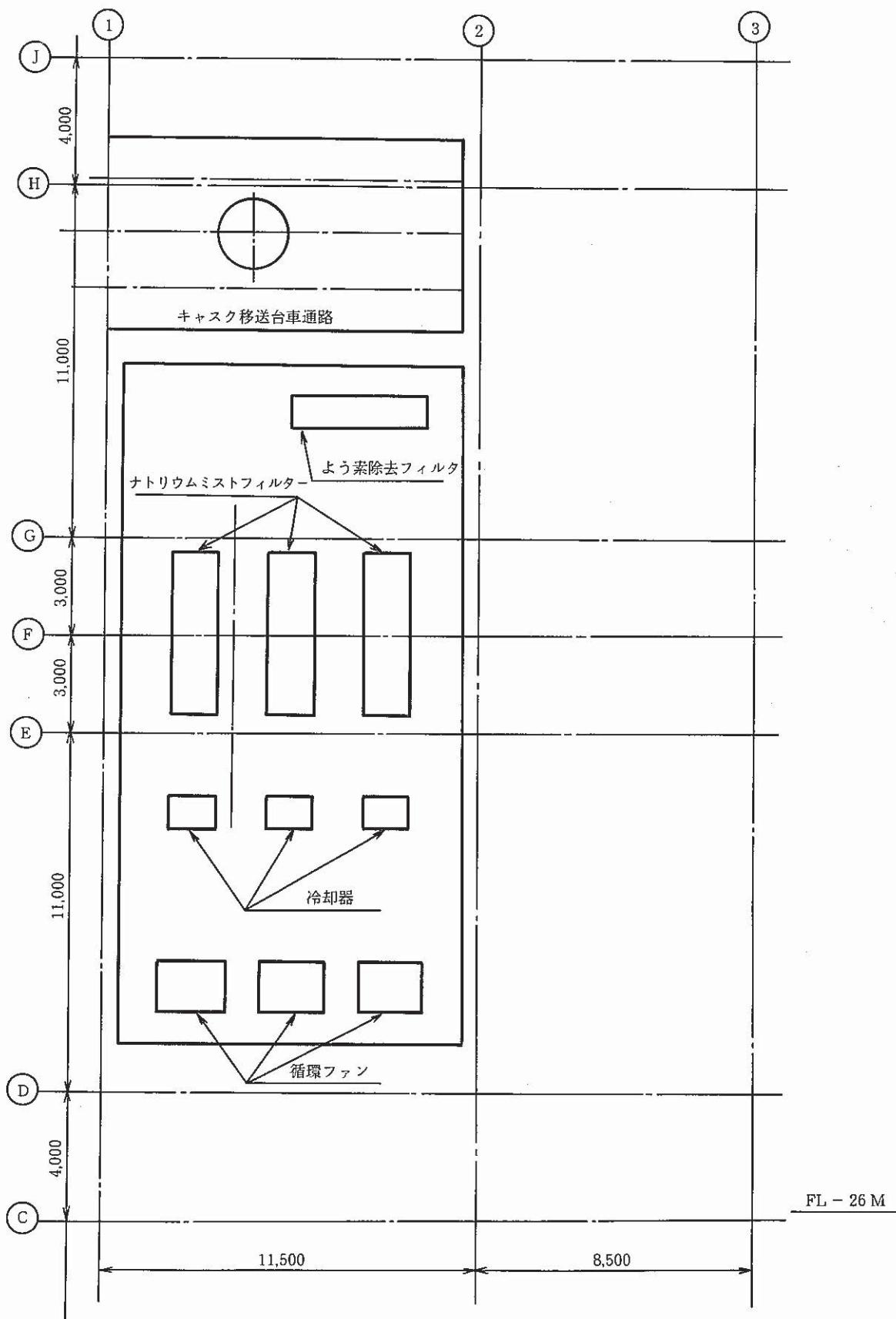


図 4.7-12 燃料取扱設備全体配置計画図 1 / 5

(Ar ガスセル霧囲気調整設備配置計画)

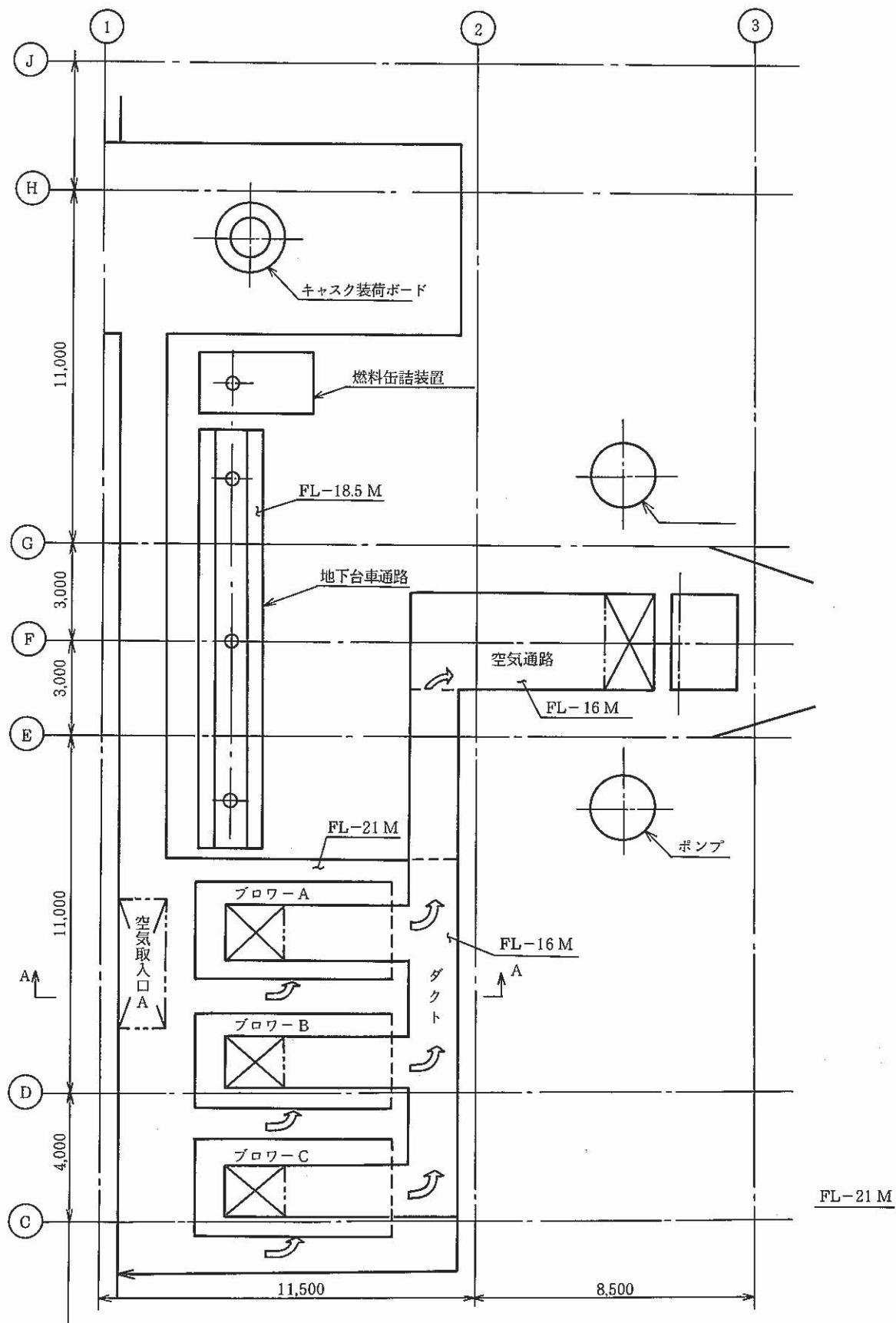
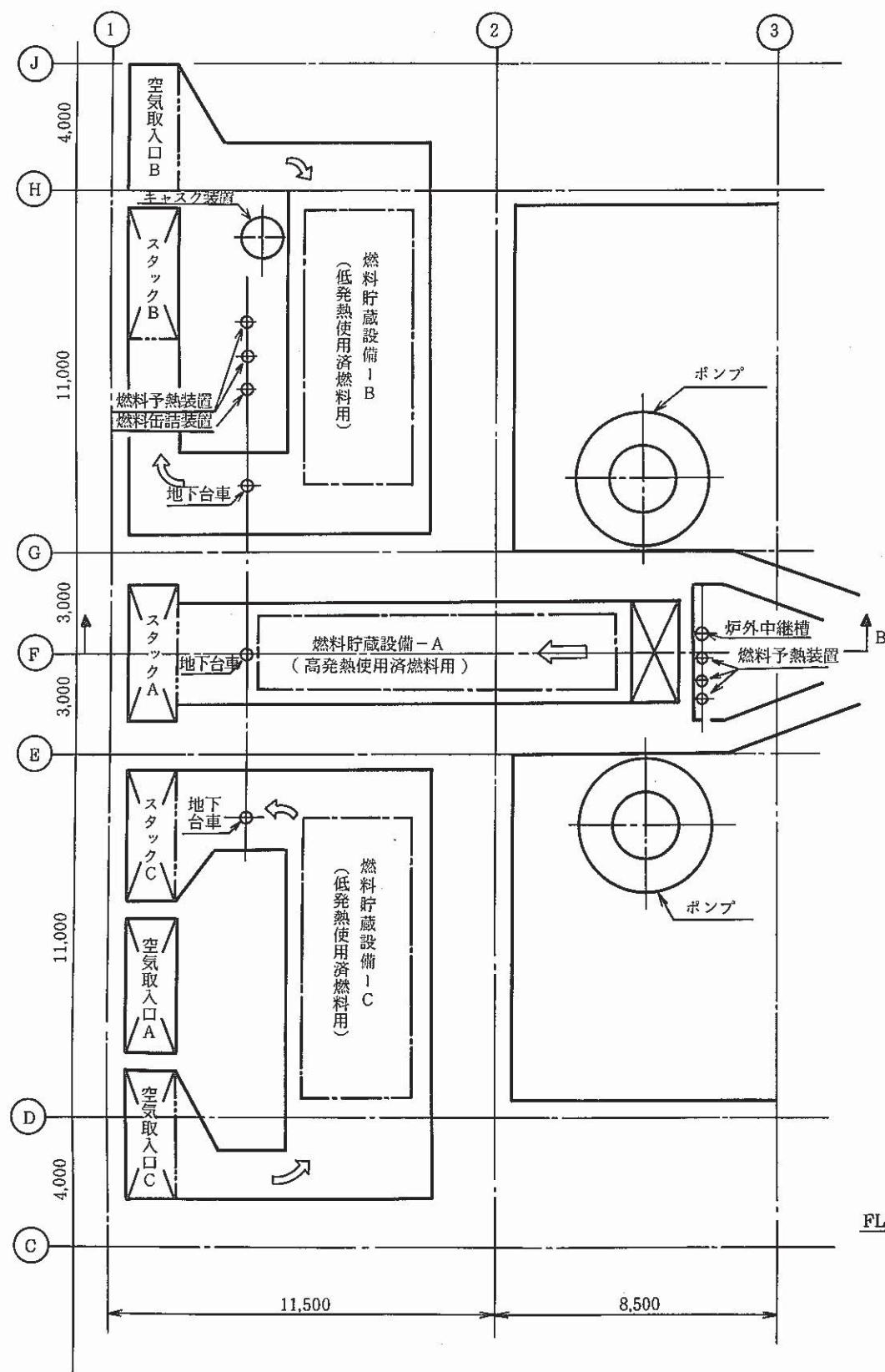


図 4.7-13 燃料取扱設備全体配置計画図 2/5
(燃料貯蔵設備冷却系配置計画)



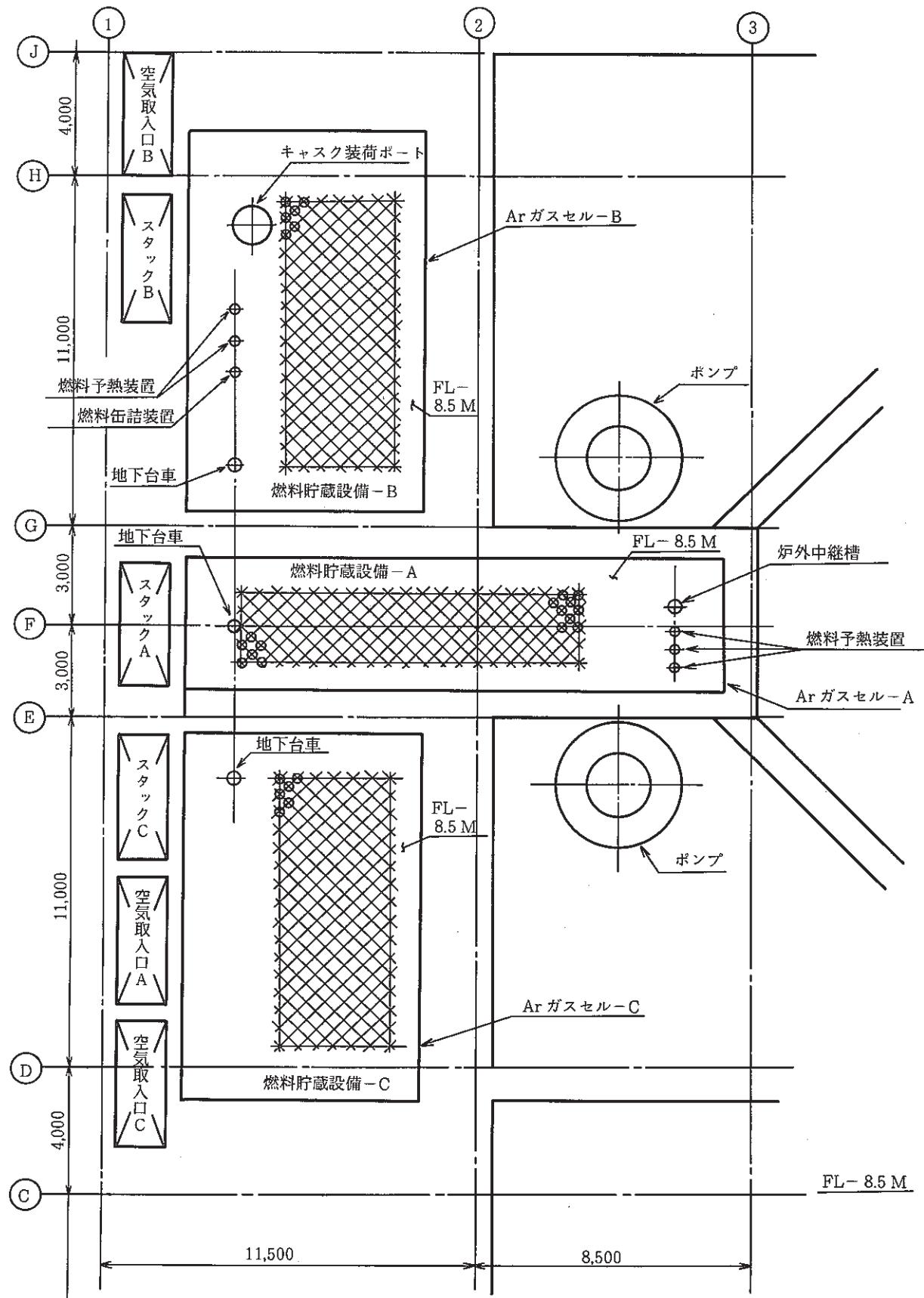


図 4.7-15 燃料取扱設備全体配置計画 4/5
(燃料貯蔵設備配置計画)

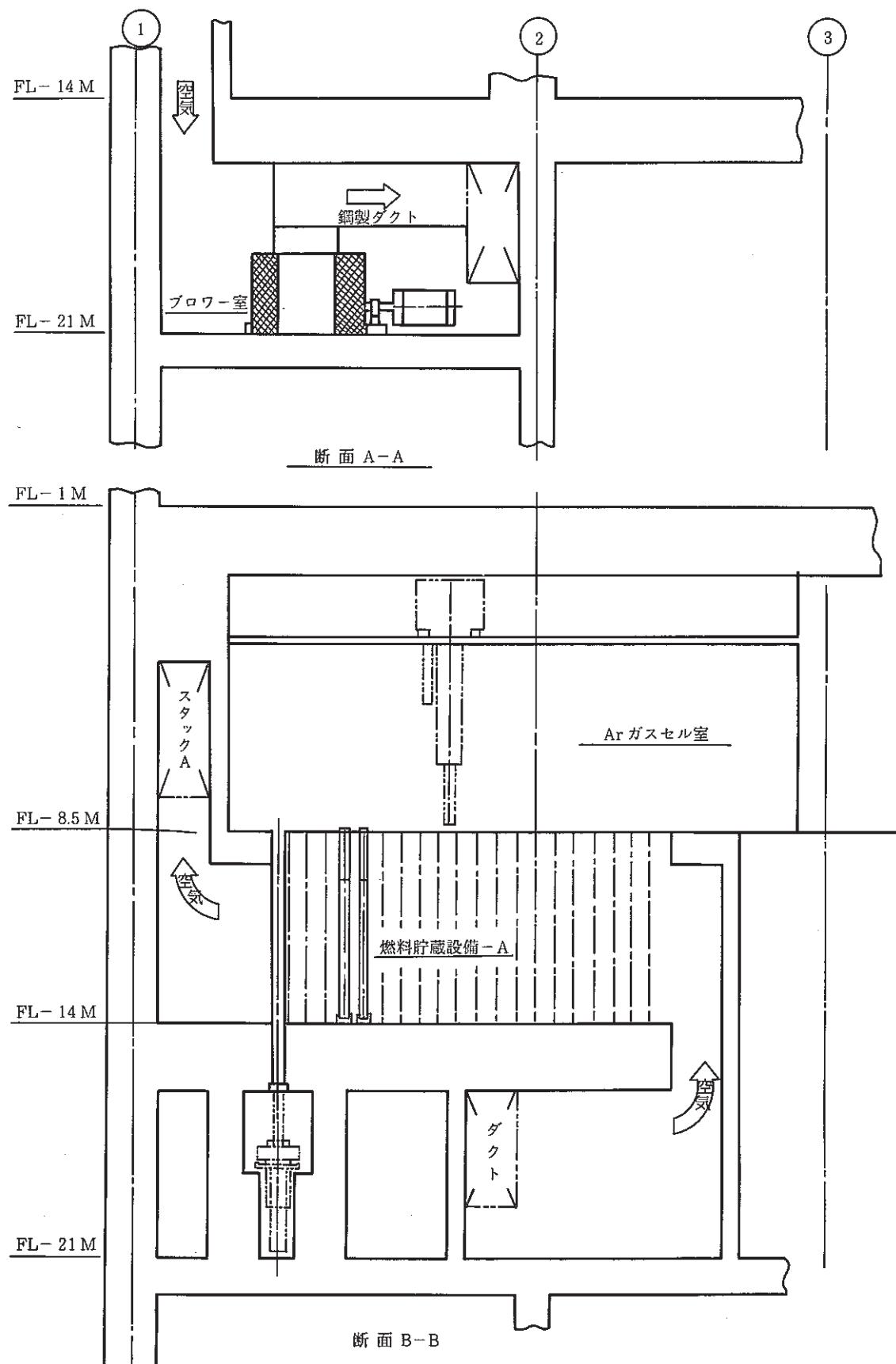


図 4.7-16 燃料取扱設備全体配置計画図 5/5
(燃料貯蔵設備冷却系配置断面図)

4.7.10. 物量評価

保持筒内ナトリウムポット EVS 方式による燃料取扱設備の物量を表 4.7-11に示す。

なお物量は機器のみであり、Ar ガスセルの遮蔽体、ライナ等の付帯設備、建家、鉄架構類等は含んでいない。

表 4.7-12に建家等の面積を示す。

表 4.7-11 ナトリウムポット方式燃料取扱設備の物量

| 機器名称 | 基 数 | 重 量 | 備 考 |
|------------------------|--------------------|-------------------|---------------------------------------|
| 1. 燃料貯蔵設備 | | | |
| ◦ 保持筒および保持筒プラグ | 510組 | 306 | 0.6 T／組 |
| ◦ 移送ポット | 510組 | 128 | 0.25 T／組 |
| ◦ ブロワー | 3基 | 30 | 10 T／基 |
| ◦ フィルターユニット | 1式 | 30 | |
| 2. 燃料貯蔵 Ar ガスセル内移送機 | | 小計 494 | |
| ◦ Ar ガスセル-A用 | 1基 | 16 | |
| ◦ " -B用 | 1基 | 17 | |
| ◦ " -C用 | 1基 | 17 | |
| 3. 燃料貯蔵 Ar ガスセル雰囲気調整設備 | | 小計 50 | |
| ◦ 循環ファン | 3基 | 3 | 1 T／基 |
| ◦ 冷却器 | 3基 | 9 | 3 T／基 |
| ◦ ナトリウムミストフィルタ | 3組 | 9 | 3 T／組 |
| ◦ よう素除去フィルタ | 1式 | 3 | |
| 4. 燃料貯蔵 Ar ガスセルドアバルブ | | 小計 24 | |
| ◦ ドアバルブ | 1式 | 30 | |
| ◦ キャスク接続装置 (含遮蔽体) | 1式 | 85 | |
| | | 小計 115 | |
| 5. キャスク移送台車 | 1基 | 32 | |
| 6. 地下台車 | 1基 | 3 | |
| 7. 燃料予熱装置 | 5組 | 40 * ¹ | 8 T／組 |
| 8. 燃料缶詰装置 | 1式 | 65 * ² | |
| 9. 燃料貯蔵 Ar ガスセルライナ | | | |
| ◦ Ar ガスセル-A | 630 m ² | 126 | } 0.2 T／m ² * ² |
| ◦ " -B | 685 m ² | 137 | |
| ◦ " -C | 685 m ² | 137 | |
| | | 小計 400 | |
| 総 計 | | 約 1,220 | |

* 1 移送ポット内ナトリウム精製設備は必要性を含め、今後の検討課題とする。

* 2 本年度の検討で概念詳細化の対象としていないため、従来の設計経験より推定した値である。

表 4.7-12 ナトリウムポット方式建屋等の面積

| 項目 | 面積 [m ²] | 備考 |
|-------------------------|----------------------|----|
| 1. 原子炉建屋内燃料取扱エリア床面積 | | |
| (1) Ar ガスセル-A | 120 | |
| (2) Ar ガスセル-B | 155 | |
| (3) Ar ガスセル-C | 155 | |
| (4) Ar ガスセル-A 床下(貯蔵エリア) | 40 | |
| (5) Ar ガスセル-B 床下(貯蔵エリア) | 55 | |
| (6) Ar ガスセル-C 床下(貯蔵エリア) | 60 | |
| (7) Ar ガスセル霧囲気調整設備 | 240 | |
| (8) キャスク移送台車、地下台車通路 | 95 | |
| (9) 燃料缶詰装置 | 10 | |
| (10) 燃料取扱系制御室 | 150 | |
| (11) その他(電気設備室等) | 150 | |
| | 計 1,230 | |
| 2. Ar ガスセルライナ表面積 | | |
| (1) Ar ガスセル-A | 630 | |
| (2) Ar ガスセル-B | 685 | |
| (3) Ar ガスセル-C | 685 | |
| | 計 2,000 | |

4.8 まとめ

使用済燃料を IVSによる炉内貯蔵を行わずに直接取り出し、かつ炉外貯蔵設備として「もんじゅ」のような大型のナトリウム容器（EVST）を必要としない燃料取扱系として、ナトリウムポット及びナトリウムキャスクによる EVS 方式の燃料取扱系の成立性を検討し、保持筒内貯蔵方式と、He ガス缶詰による原子炉建家外貯蔵設備での貯蔵を組み合わせた方式について、成立性を見通した上で設備設計を実施した。

以下に検討結果をまとめて示す。

(1) ナトリウムキャスク EVS 方式は、使用済燃料貯蔵キャスク（100t キャスク）の除熱性能が約39 kW（ヘリウムガスギャップありの場合）程度しか確保されないため、原子炉停止後直接取り出される高発熱使用済燃料（崩壊熱20～30 kW）を貯蔵するためには、キャスク1体に使用済燃料は1体しか貯蔵出来ず、交換燃料集合体数が百数十体に及ぶ大型炉の燃料貯蔵設備としては物量が増加することから適当でない。

また、1 キャスクに7体の集合体が収納できるまで（1体あたりの崩壊熱は約 5.5 kW）崩壊熱の減衰待ちを行うとすれば、原子炉停止後約17週間の減衰待ち期間を必要とするため、直接取り出し方式としても、ナトリウムキャスク EVS 方式は適さない。

(2) Ar ガスセル内貯蔵によるナトリウムポット EVS 方式は、除熱性が高く約32 kW／体の崩壊熱を持つ使用済燃料を貯蔵することが出来るが、ポット破損によるナトリウム抜け落ち事故を想定すると、3 kW／体程度の低崩壊熱使用済燃料でも、制限温度 675 °C を越え安全上課題が残る。

(3) 保持筒によるナトリウムポット EVS 方式は、除熱性は Ar ガスセル内貯蔵方式より劣るもの、20 kW／体崩壊熱を持つ使用済燃料まで貯蔵することが可能で、ポット破損によるナトリウム抜け落ち事故を想定しても、保持筒により、ナトリウム液位が保持され除熱性はそのまま確保される。従って EVS 方式としては保持筒内貯蔵ナトリウムポット EVS 方式に成立性が見通せる。

(4) 保持筒内貯蔵ナトリウムポット EVS 方式の燃料取扱設備の場合、崩壊熱の低い使用済燃料から交換を開始することにすれば、原子炉停止後 4 日めから燃料交換作業を開始することが出来、1 日に交換出来る集合体数を 8 体としても、最短で 20 日間（原子炉停止後 11 日めに燃料交換開始、30 日めに終了）で燃料交換作業を終了させることが出来る。ただし、1 日に交換出来る集合体数を増加させれば、更なる燃料交換作業の短縮化が図れると考えられるが、最も発熱の高い使用済燃料は、原子炉停止後 22 日めからしか取り扱えないので、最終的な燃料交換作業の終了は、最大発熱を持つ使用済燃料を原子炉停止後 22 日めから何日間で交換することが出来るかということに依存する。

(5) 保持筒内ナトリウムポット EVS 方式による使用済燃料貯蔵設備は、強制通風冷却を行う高発熱燃料用貯蔵設備と、自然通風冷却を行う低発熱燃料用貯蔵設備に分け、自然通風冷却での

貯蔵が可能となる 5 kW／1 体程度まで崩壊熱が減衰するのに伴って、高発熱燃料用貯蔵設備から低発熱燃料用貯蔵設備に順次燃料を移送してゆく。

また、崩壊熱がポット内ナトリウムの凍結が心配される程（2 kW／1 体）まで低下してきた場合、使用済燃料をナトリウムポットから He ガス缶詰にして、原子炉建屋以外のところにある使用済燃料貯蔵施設に貯蔵する。これによって、

- ① 冷却設備の合理化
- ② 原子炉建家内貯蔵量の最適化

（全炉心分 3 バッチ、貯蔵セルメンテナンスのため 3 貯蔵設備）

を図ることが出来る。

- (6) 使用済燃料は洗浄せず、ナトリウム中もしくは He ガス中で取り扱い、洗浄設備の合理化（削除）を図ることができた。使用済燃料の洗浄は再処理施設側で行うものとした。
- (7) 保持筒内ナトリウムポット EVS 方式と He ガス缶詰貯蔵を組み合わせた方式は、破損燃料についても健全燃料と同様な設備、手順で取り扱うことが出来、専用設備を必要としない合理化が図れた。
- (8) EVS 方式の燃料取扱系の異常事象としては、使用燃料移送中のポット内ナトリウム漏洩事故が最も厳しく、大規模な漏洩を想定すると燃料被覆管の溶融に至る可能性がある。この場合公衆被曝を防止することは困難と予想されることから、ナトリウム漏洩に至る事象の発生防止ないし漏洩規模の限定を目指したミスマッチが必要である。

5. IVS方式及びEVS方式の比較

高速増殖大型炉の燃料取扱系として、IVS方式とEVS方式どちらが最適かという問題は単純でなく、表5.1-1に示す様に、炉外中性子検出器や炉容器径に与えるインパクト等、燃料取扱系以外の設備についても考慮し、総合的な判断が必要であると考えられる。表5.1-1は、これまで行った検討結果をもとに考えられる代表的な比較評価項目について、IVS方式とEVS方式を比較したものである。

IVS方式は、炉内に使用済燃料貯蔵設備を設けているので、原子炉容器径の増加は免れられないばかりでなく、IVSが炉内に存在することにより中性子検出器の感度が低下し起動系中性子検出器の成立性が懸念され、またIVSからの漏れ中性子による炉容器・炉心槽の中性子照射量が増加するという課題がある。反面、EVS方式は、上記のような炉容器内に使用済燃料貯蔵設備があることに起因する課題はないものの、炉内に於ける減衰待ち貯蔵がないためIVS方式に比較して非常に高い発熱量を持つ使用済燃料を取り扱う必要があり、十分な除熱対策が不可欠であるという課題を残す。

使用済燃料のサイト外搬出待ち貯蔵に関しては、IVS方式は衰減待ち貯蔵がすでに炉内でなされ、発熱量が4kW程度となった使用済燃料を取扱うことから、水中貯蔵を行うのが最適と考えられる。一方、EVS方式は炉外取り出し時の発熱量が20kW程度であることを考えるとIVS方式のように炉外取り出し直後から水中貯蔵を行うには発熱量が高すぎ、衰減待ち貯蔵としてナトリウム中に於ける貯蔵を実施し、その後何らかの形で搬出待ち貯蔵に移行するのが適当と考えられる。即ち使用済燃料の搬出に関しては、使用済燃料をナトリウム中に入れた状態で搬出するのは安全上好ましくなく、また崩壊熱の更なる減衰によってナトリウムが凍結することが考えられるので、EVS方式は搬出待ち貯蔵段階からはナトリウム以外による貯蔵（たとえば水中貯蔵、ガス中貯蔵）に移行する必要がある。この場合、ナトリウム系による減衰待ち貯蔵を十分に行い、搬出待ち貯蔵としてはガス中貯蔵が可能な程度まで崩壊熱を減衰させることができるとすれば、高速炉の燃料取扱系の合理化を妨げる一因となっている、使用済燃料のナトリウム系から水系への移行に伴う洗浄、雰囲気移行が不要となり、燃料取扱系としての合理化が可能になる。この観点からの合理化については、IVS方式は炉外取り出し時の使用済燃料の崩壊熱がガス中貯蔵に適合する程低下していないので、搬出待ち貯蔵としては水中貯蔵を行わざるを得ず、使用済燃料をナトリウム系から水系へ移行させるために必要な設備の合理化は期待出来ない。もちろん、IVS方式にナトリウム系による貯蔵設備を設け、崩壊熱を減衰させてからガス中貯蔵に適合させるのは、設備が冗長化し不適切である。（ただし、燃料が高燃焼度化され原子炉の運転サイクルが長期化することによりIVSでの貯蔵期間が延長され、炉外取り出し時の発熱量が低下する場合は、炉外取り出し直後からガス中貯蔵が可能になり、ナトリウム系から水系への移行に伴う設備の合理化の余地が生じる可能性もある。）

以上のような比較を行ったとしても、現在のところ IVS 方式、 EVS 方式について総合的な判断を下すことは難しいが、物量という観点で割り切った比較をすることは可能である。表 5.1-2 に 60 年度設計、61年度設計に於ける IVS 方式の燃料取扱系と、EVS 方式（保持筒内貯蔵ナトリウムポット EVS 方式）の燃料取扱系の物量比較を示す。表から EVS 方式は 60 年度設計の IVS 方式とほぼ同じ物量であることがわかり、60 年度設計の IVS 方式を更に合理化した 61 年度設計の IVS 方式とも EVS 方式は競合出来る位置にあることがわかる。従って物量の点で IVS 方式、EVS 方式に大きな差が認められないという観点に立てば、炉容器径が縮小化出来、Na 系から水系への雰囲気移行が不要で炉外中性子検出が可能である等の EVS 方式に係るメリットがクローズアップされ、EVS 方式が高速増殖大型炉の燃料取扱系として有望であると考えることが出来る。61 年度の検討は EVS 方式の成立性を見極めることに主眼が置かれたが、成立の見通しがあるという検討結果を踏まえ、今後更なる設備の合理化を追求することにより、更に本概念が有力なものとなることが考えられる。

表 5.1 - 1 IVS方式とEVS方式の比較

| 比 較 項 目 | I V S 方 式 | E V S 方 式 | 評 値 | |
|------------------------|---|-------------------------------------|------|------|
| | | | I VS | E VS |
| (1) 炉外中性子検出 | 起動系成立性困難 | 容 易 | | ○ |
| (2) 原子炉容器径 | EVSに比べて増大 (IVS領域の確保) ① 炉内構成の大型化 ② 燃料交換機のアクセス範囲 拡大による回転プラグの大 型化 | - | | ○ |
| (3) 燃料取扱設備の合理化 | 簡易化可能 | 除熱対策不可欠 | ○ | |
| (4) 事 故 時 対 応 | 冷却系の多重化で対応 | 高発熱燃料の対応が必要 ナトリウム抜け落ち事故対策が必 要 | ○ | |
| (5) 搬出及び搬出待ち貯蔵 | 水中貯蔵 | ガス貯蔵 | | |
| (6) 使用済燃料洗浄 | 必ず必要 | 合理化可能 | | ○ |
| (7) 使用済燃料の湾曲による挿入 性 | 対応困難 | 対応容易 | | ○ |
| (8) 炉容器・炉心槽の中性子照射 量 | 増 加 | | | ○ |

表 5.1-2 IVS方式と EVS方式の物量比較

| 系 統 名 称 | I V S 方 式 | | EVS 方式 | 備 考 |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----|
| | 60年度設計 | 61年度設計 | | |
| 1. 不活性ガスセル | | | | |
| (1) 使用済燃料貯蔵設備 | — | — | 434 t | |
| (2) 新燃料貯蔵設備 | 40 t | 70 t | | |
| (3) 地下台車 | — | — | 3 t | |
| (4) 新燃料受入地下台車 | 25 t | 20 t | — | |
| (5) 燃料洗浄設備 | 90 t | 90 t | — | |
| (6) 使用済燃料缶詰装置 | — | — | 65 t | |
| (7) 破損燃料缶詰装置 | 60 t | 20 t | — | |
| (8) セルライナ | 130 t | 130 t | 400 t | |
| (9) 燃料予熱装置 | — | — | 40 t | |
| (10) セル内移送機 | 50 t | 53 t | 50 t | |
| (11) 不活性ガスセル雰囲 気調整系 | 50 t | 50 t | 24 t | |
| (12) 使用済燃料貯蔵設備 冷却系 | — | — | 60 t | |
| 2. 空気セル | | | | |
| (1) セル内移送機 | 50 t | — | — | |
| (2) キャスク台車 | 60 t | — | — | |
| (3) 空気セル雰囲気調整 系 | 30 t | — | — | |
| 3. 燃料貯蔵プール | | | | |
| (1) 水中台車 | 20 t | 10 t | — | |
| (2) プール移送機 | 50 t | 50 t | — | |
| (3) 水中貯蔵ラック | 200 t | 90 t | — | |
| (4) プールライナ | 130 t | 130 t | — | |
| (5) プール水浄化系 | 200 t | 200 t | — | |
| (6) プール中継槽 | — | 14 t | — | |
| 3. その 他 | | | | |
| (1) キャスククレーン | — | 100 t | — | |
| (2) キャスク移送台車 | — | — | 32 t | |
| (3) キャスク接続装置 | — | — | 85 t | |
| (4) ドアバルブ | 30 t | 30 t | 30 t | |
| 総 計 | 約 1,220 | 約 1,060 t | 約 1,220 t | |

6. 結 言

本検討では電気出力 100 万 kW 級の高速増殖大型炉に於ける燃料取扱系として IVS 及び EVS 両方式の検討を行った。

IVS 方式については、60 年度検討した結果をもとに更なる合理化を追求し、空気セルの削除（含地下台車の廃止）及び使用済燃料貯蔵ラックの稠密化を行うことにより、60 年度設計に比較し 13% の物量削減が実現出来た。

EVS 方式については、通常時及び異常時の除熱能力の観点から、保持管内貯蔵ナトリウムポット EVS 方式に成立性の見通しが得られ、その貯蔵可能な使用済燃料の崩壊熱 レベルは 20 kW であることがわかった。これによって、IVS を削除することにより炉容器の縮小化を図り、かつ炉外貯蔵設備として「もんじゅ」のような大型のナトリウム容器を必要としない燃料取扱設備の 1 設計例が示された。

IVS 方式、EVS 方式を比較した場合、物量の観点からは大きな差異は認められず、EVS 方式は IVS 方式に十分競合出来るものと考えられる。この事を前提にした場合、①炉容器の縮少化が期待出来る。②Na 系から水系の雰囲気移行に伴う設備及び作業の合理化が期待出来、洗浄廃液等の放射性廃棄物の発生量を低減することができる。③炉外 NIS を可能にする等の理由から、高速増殖大型炉の燃料取扱系としては、EVS 方式が有力であることがわかった。

7. 謝 辞

本検討を進めるにあたっては、機器構造開発部機器システム開発室 片岡一研究員、実験炉部原子炉第一課 安哲徳氏、動力炉開発推進本部実証炉室 一宮正和副主任研究員（現在日本原子力発電）、富士電機株式会社 井上隆氏、戸部賢治氏、川崎重工業株式会社 高橋範明氏、南了悟氏、赤松幹夫氏、竹村守雄氏に多大な助言と協力を頂いた。

ここに感謝の意を表するものである。

8. 参考文献

(1) 高速増殖大型炉の設計主要項目に関する研究(I)

実証炉に係る研究

燃料取扱設備に係る検討

富士電機株式会社

PNC SJ 2068 87-002 (1), (2)

(2) 高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究(I)

実証炉に系る研究

EVS方式による燃料取扱設備の検討

川崎重工業株式会社

PNC SJ 2055 87-001 (1), (2)

(3) 高速増殖実証炉・第2次概念設計(I)

設計書(分冊5/5)

PNC ZJ 278 83-17 (5)

(4) 伝熱工学

一色尚次 北山直万 共著

森北出版株式会社

(5) 伝熱工学資料

改訂第3版

日本機械学会

(6) 機械工学便覧

日本機械学会

(7) 高速炉基本領域の放射線減衰評価

PNC N 241 84-02

付一 ナトリウムキャスク EVS方式実効増倍率の計算手法

(1) 解析手順

実効増倍率の解析手順を図付 1 - 1 に示す。

i) 断面積作成

臨界安全評価用の 218 群断面積ライブラリー CSRL の共鳴処理を AMPX を用いて行い、
218 群マクロ断面積を作成した。これを用いて燃料ピンのピンセルに対する 1 次元輸送計算
(ANISN, P1-S4 近似) を行い、27群の縮約マクロ断面積を作成した。ラッパ管、外周部Na,
遮蔽体等についても同様の手法により縮約断面積を作成した。

ii) 実効増倍率計算

移送ポットを均質化したキャスクセルに対する 1 次元輸送計算 (ANISN, P1-S4 近似)
により求めた。

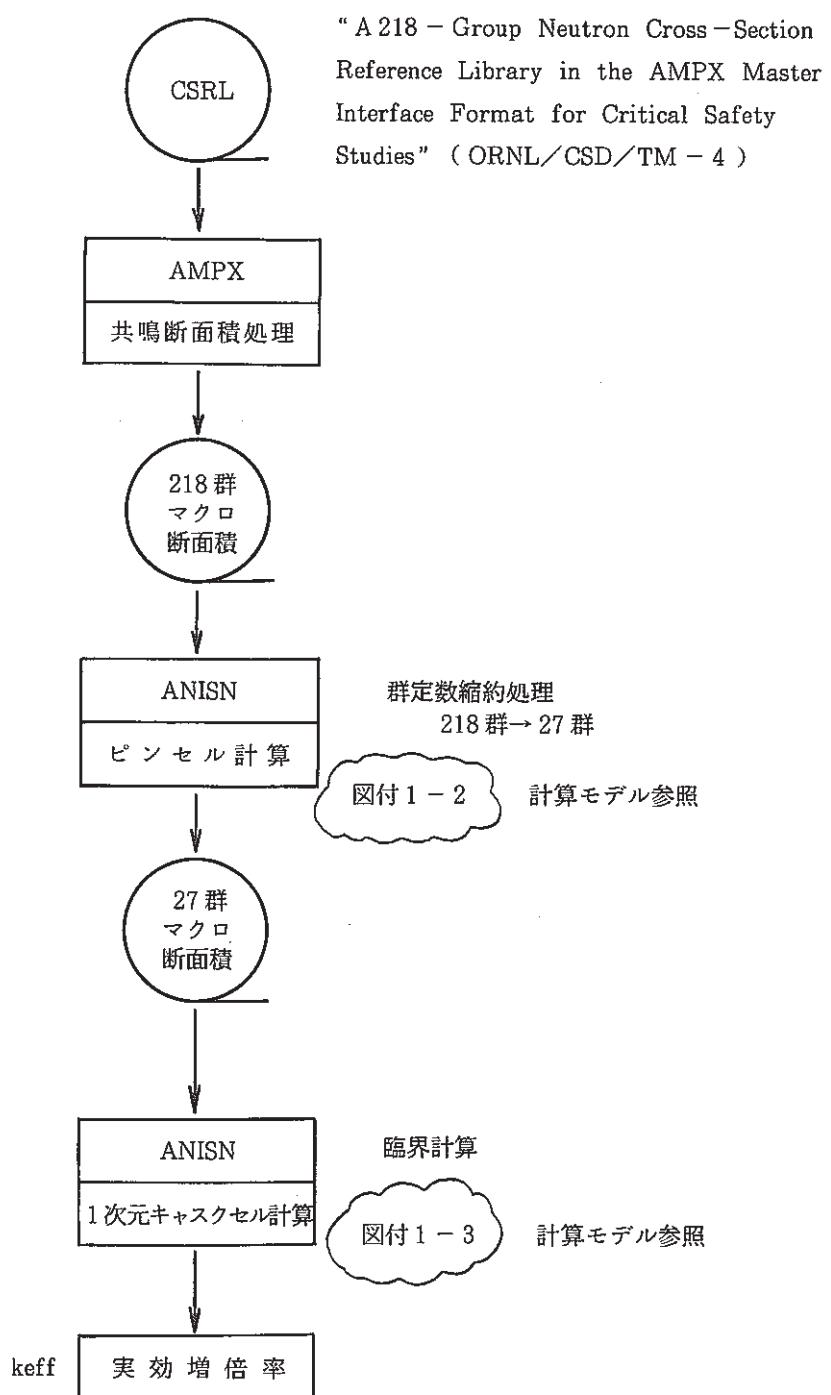
(2) 解析モデル

i) ピンセル計算

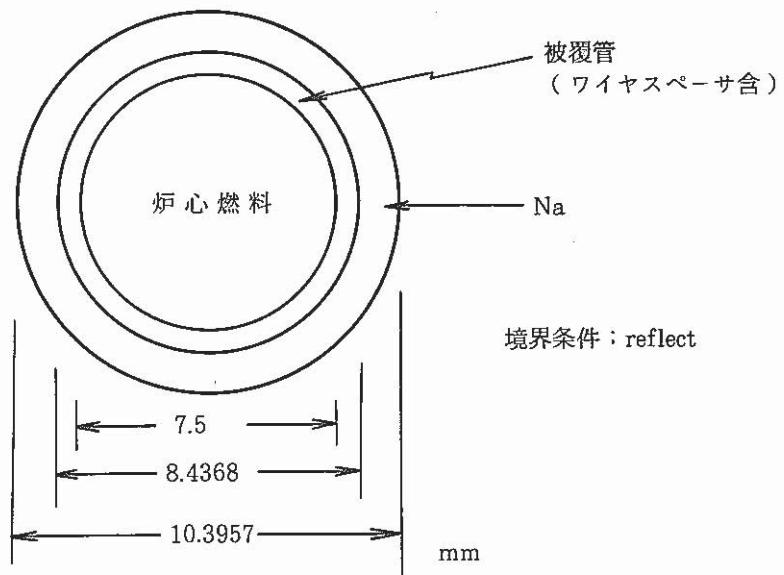
ピンセル 1 次元計算モデルを図付 1 - 2 に示す。

ii) キャスクセル計算

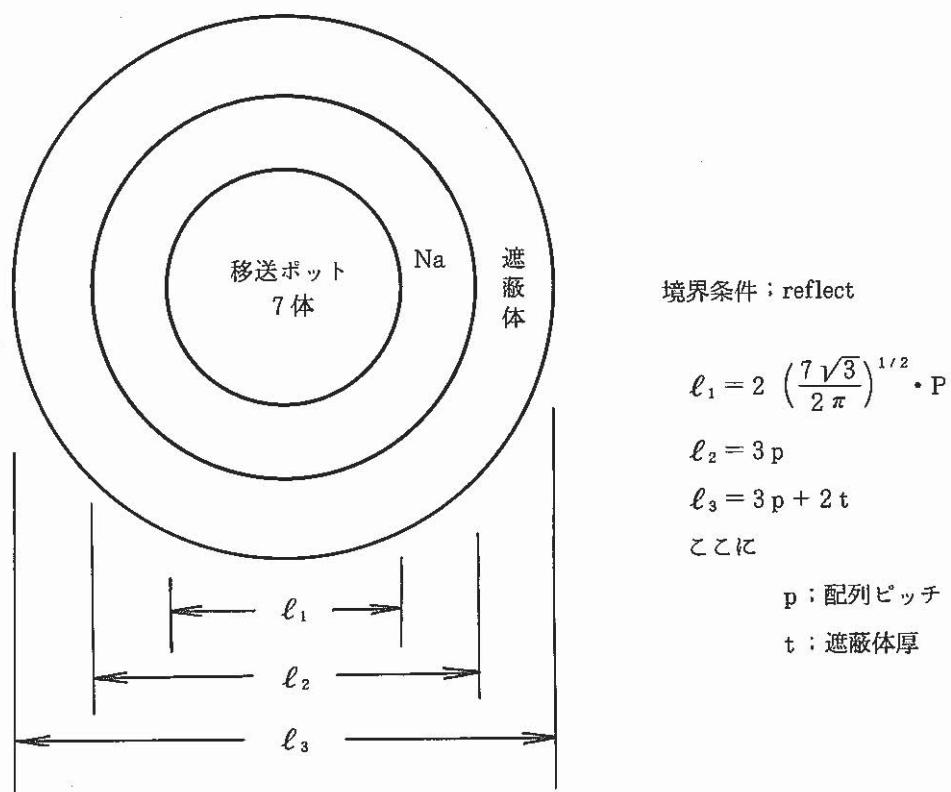
計算モデルを図付 1 - 3 に示す。図 4.3 - 3 の破線で示す六角セルを均質化し、中心か
ら層状に、移送ポット部 (7 体), Na, 遮蔽体と配列する。燃料長は、上、下ブランケット各 30cm, 遮蔽材その他を考慮し、保守的評価となるように 160 cm とした。



図付1-1 実効増倍率解析手順



図付 1-2 ピンセル計算モデル



図付 1-3 キャスクセル計算モデル

付一 2 集合体 1 体あたりの線源強度

最高燃焼度をもつ内側炉心燃料について ORIGEN * を用いて集合体 1 体あたりの線源強度を求めた。結果を表付 2-1 ~ 表付 2-5 に示す。

* ORNL-5621 "ORIGEN 2-A Revised and Updated Version of the Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code" A.G. Croff (July 1980)

表付 2 - 2 使用済燃料集合体線源密度（内側炉心燃料）
中性子発生数：自発核分裂

NEUTRON SOURCE IN FUEL AS A FUNCTION OF TIME

| | ** COOLING ** | | | | | | | | | | | |
|-------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| | SPONTANEOUS FISSION NEUTRON SOURCE IN DISCHARGED FUEL, NEUTRONS/SEC | | | | | | | | | | | |
| | BASIS = ** 10 CYCLE COOLING ** | | | | | | | | | | | |
| | INITIAL | 3. D | 7. D | 14. D | 21. D | 28. D | 56. D | 112. D | 182. D | 365. D | 730. D | |
| PU238 | 4.92E+04 | 4.95E+04 | 4.98E+04 | 5.02E+04 | 5.06E+04 | 5.10E+04 | 5.24E+04 | 5.49E+04 | 5.72E+04 | 6.06E+04 | 6.27E+04 | |
| PU240 | 3.82E+06 | 3.82E+06 | 3.82E+06 | 3.82E+06 | 3.82E+06 | 3.82E+06 | 3.82E+06 | 3.82E+06 | 3.82E+06 | 3.82E+06 | 3.82E+06 | |
| PU242 | 1.20E+06 | 1.20E+06 | 1.20E+06 | 1.20E+06 | 1.20E+06 | 1.20E+06 | 1.20E+06 | 1.20E+06 | 1.20E+06 | 1.20E+06 | 1.20E+06 | |
| PU244 | 1.01E+01 | 1.01E+01 | 1.01E+01 | 1.01E+01 | 1.01E+01 | 1.01E+01 | 1.01E+01 | 1.01E+01 | 1.01E+01 | 1.01E+01 | 1.01E+01 | |
| CH242 | 1.28E+08 | 1.27E+08 | 1.25E+08 | 1.21E+08 | 1.17E+08 | 1.14E+08 | 1.01E+08 | 7.98E+07 | 5.93E+07 | 2.73E+07 | 5.95E+06 | |
| CH244 | 7.55E+07 | 7.55E+07 | 7.54E+07 | 7.54E+07 | 7.53E+07 | 7.53E+07 | 7.50E+07 | 7.46E+07 | 7.41E+07 | 7.26E+07 | 6.99E+07 | |
| CH246 | 9.77E+04 | 9.77E+04 | 9.77E+04 | 9.77E+04 | 9.77E+04 | 9.77E+04 | 9.77E+04 | 9.77E+04 | 9.77E+04 | 9.77E+04 | 9.77E+04 | |
| CH248 | 2.35E+02 | 2.35E+02 | 2.35E+02 | 2.35E+02 | 2.35E+02 | 2.35E+02 | 2.35E+02 | 2.35E+02 | 2.35E+02 | 2.35E+02 | 2.35E+02 | |
| CM250 | 7.45E-03 | 7.45E-03 | 7.45E-03 | 7.45E-03 | 7.45E-03 | 7.45E-03 | 7.45E-03 | 7.45E-03 | 7.45E-03 | 7.45E-03 | 7.45E-03 | |
| CF250 | 2.51E+01 | 2.51E+01 | 2.51E+01 | 2.51E+01 | 2.51E+01 | 2.51E+01 | 2.50E+01 | 2.48E+01 | 2.45E+01 | 2.39E+01 | 2.26E+01 | |
| CF252 | 1.32E+00 | 1.31E+00 | 1.31E+00 | 1.30E+00 | 1.30E+00 | 1.29E+00 | 1.26E+00 | 1.21E+00 | 1.16E+00 | 1.01E+00 | 7.80E-01 | |
| CF254 | 1.58E-02 | 1.53E-02 | 1.46E-02 | 1.35E-02 | 1.24E-02 | 1.15E-02 | 8.32E-03 | 4.38E-03 | 1.96E-03 | 2.41E-04 | 3.71E-06 | |
| TOTAL | 2.08E+08 | 2.07E+08 | 2.05E+08 | 2.02E+08 | 1.98E+08 | 1.94E+08 | 1.81E+08 | 1.60E+08 | 1.39E+08 | 1.05E+08 | 8.10E+07 | |

表付 2 - 4 使用済燃料集合体線源強度（内側炉心燃料）
 ギ線発生スペクトル：FP 核種

PHOTON SPECTRUM AS A FUNCTION OF TIME FOR FISSION PRODUCTS

```

** COOLING **
POWER= 8.35 MW, BURNUP= 10307.MWD, FLUX= 3.68E+15 N==2-SEC
TWELVE GROUP PHOTON RELEASE RATES, PHOTONS/SEC
BASIS = ** 10 CYCLE COOLING **

EMEAN          TIME AFTER DISCHARGE
(MeV)      INITIAL     3. D     7. D    14. D    21. D    28. D    56. D   112. D   182. D   365. D   730. D
3.00E-01  2.98E+17  3.79E+16  2.42E+16  1.45E+16  1.02E+16  7.85E+15  4.52E+15  3.06E+15  2.37E+15  1.53E+15  7.31E+14
6.30E-01  4.94E+17  1.08E+17  8.24E+16  6.51E+16  5.64E+16  5.05E+16  3.64E+16  2.21E+16  1.30E+16  5.20E+15  2.85E+15
1.10E+00  1.93E+17  7.36E+15  4.31E+15  2.58E+15  1.88E+15  1.48E+15  8.34E+14  5.67E+14  4.69E+14  3.27E+14  1.72E+14
1.55E+00  1.00E+17  1.60E+16  1.29E+16  8.73E+15  5.97E+15  4.11E+15  9.92E+14  1.46E+14  9.00E+13  6.23E+13  3.23E+13
1.99E+00  1.92E+16  4.35E+14  2.73E+14  1.78E+14  1.45E+14  1.28E+14  9.88E+13  7.98E+13  6.73E+13  4.41E+13  1.92E+13
2.38E+00  2.03E+16  4.96E+14  4.14E+14  2.91E+14  2.04E+14  1.45E+14  4.36E+13  1.52E+13  1.22E+13  8.61E+12  4.32E+12
4.75E+00  7.93E+15  1.32E+12  1.31E+12  1.29E+12  1.28E+12  1.26E+12  1.19E+12  1.08E+12  9.43E+11  6.68E+11  3.36E+11
5.25E+00  2.06E+16  4.57E+10  4.24E+10  4.10E+10  4.04E+10  3.98E+10  3.78E+10  3.40E+10  2.98E+10  2.11E+10  1.07E+10
3.70E+00  6.42E+14  0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
4.22E+00  1.69E+15  0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
4.70E+00  7.55E+14  0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
5.25E+00  1.97E+14  0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
TOTAL    1.16E+18  1.70E+17  1.24E+17  9.13E+16  7.47E+16  6.42E+16  4.29E+16  2.59E+16  1.60E+16  7.18E+15  3.81E+15
HEV/SEC  9.58E+17  1.14E+17  8.54E+16  6.27E+16  5.06E+16  4.28E+16  2.71E+16  1.59E+16  9.70E+15  4.30E+15  2.30E+15

TWELVE GROUP ENERGY RELEASE RATES, HEV/WATT-SEC
BASIS = ** 10 CYCLE COOLING **

EMEAN          TIME AFTER DISCHARGE
(MeV)      INITIAL     3. D     7. D    14. D    21. D    28. D    56. D   112. D   182. D   365. D   730. D
3.00E-01  1.07E+10  1.36E+09  8.69E+08  5.20E+08  3.65E+08  2.82E+08  1.63E+08  1.10E+08  8.53E+07  5.51E+07  2.63E+07
6.30E-01  3.73E+10  8.13E+09  6.22E+09  4.91E+09  4.25E+09  3.81E+09  2.75E+09  1.67E+09  9.79E+08  3.93E+08  2.15E+08
1.10E+00  2.54E+10  9.71E+08  5.68E+08  3.40E+08  2.47E+08  1.95E+08  1.10E+08  7.47E+07  6.18E+07  4.30E+07  2.27E+07
1.55E+00  1.87E+10  2.98E+09  2.40E+09  1.62E+09  1.11E+09  7.63E+08  1.84E+08  2.72E+07  1.67E+07  1.16E+07  5.99E+06
1.99E+00  4.57E+09  1.04E+08  6.51E+07  4.24E+07  3.45E+07  3.05E+07  2.36E+07  1.90E+07  1.60E+07  1.05E+07  4.57E+06
2.38E+00  5.80E+09  1.41E+08  1.18E+08  8.30E+07  5.83E+07  4.13E+07  1.24E+07  4.35E+06  3.48E+06  2.46E+06  1.23E+06
2.75E+00  2.61E+09  4.35E+05  4.32E+05  4.26E+05  4.20E+05  4.15E+05  3.94E+05  3.54E+05  3.11E+05  2.20E+05  1.11E+05
3.25E+00  8.03E+09  1.78E+04  1.65E+04  1.60E+04  1.57E+04  1.55E+04  1.47E+04  1.32E+04  1.16E+04  8.23E+03  4.15E+03
3.70E+00  2.84E+08  0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
4.22E+00  8.54E+08  0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
4.70E+00  4.25E+08  0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
5.25E+00  1.24E+08  0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
TOTAL    1.15E+11  1.37E+10  1.02E+10  7.52E+09  6.07E+09  5.13E+09  3.24E+09  1.90E+09  1.16E+09  5.15E+08  2.76E+08
JATTS   1.54E+05  1.83E+04  1.37E+04  1.01E+04  8.12E+03  6.86E+03  4.34E+03  2.54E+03  1.56E+03  6.90E+02  3.69E+02

```


付一 3 使用済燃料集合体 1 体収納キャスクの線量率

計算手法

(1) 計算方法

中性子およびガンマ線の線量率を一次元輸送コード ANISN による計算から求める (P 3 - S 8 近似)。中性子 100 群、ガンマ線 20 群の輸送断面積は、JSD100 および POPOP 4 ライブライリーを RADHEAT - V 3 コードで処理したものを用いた。この群構造は JSD 120 ライブライリーのものである。

(2) 解析モデル

本評価は、キャスク中央部の基本的な遮蔽構成を対象とする。

従って、解析は、キャスク径方向の 1 次元モデルにおいて実施した。このモデルを図付 3 - 1 に示す。すなわち、キャスク中央には暫定的に 1 体の燃料集合体が設置され、遮蔽体との間にはナトリウムが満たされている。

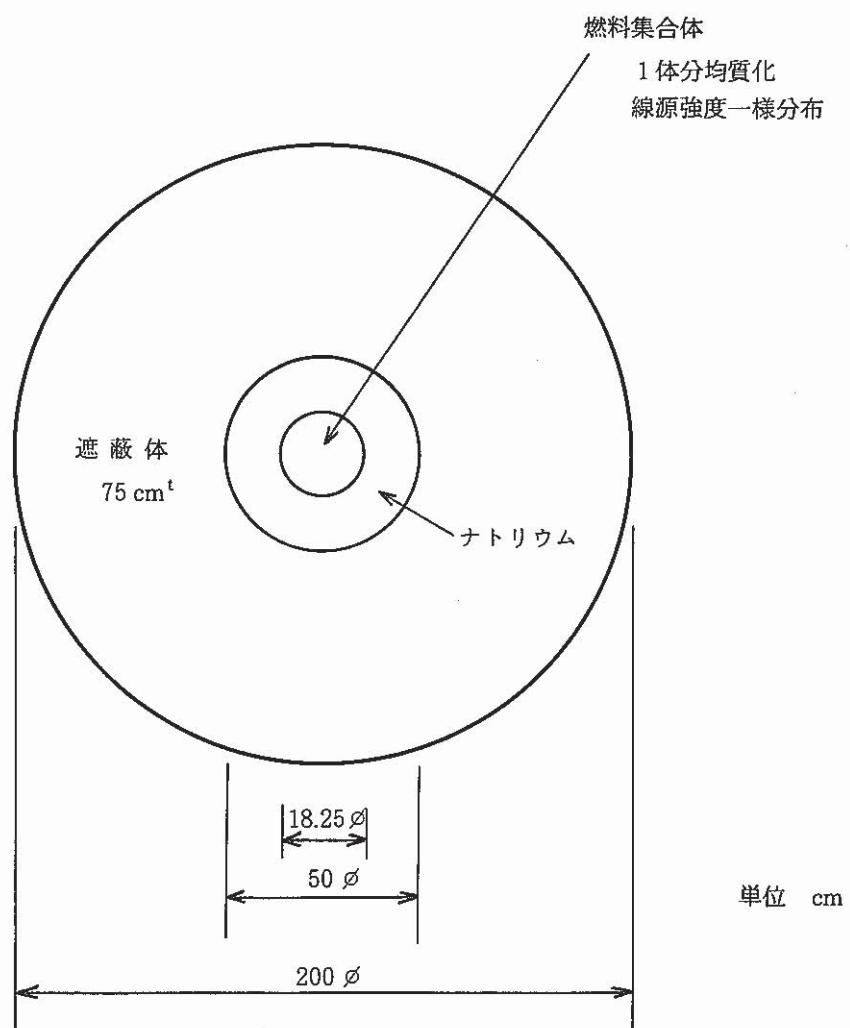
集合体の単位高さ当たりの線源強度は、線源高さを 1 m (すなわちブランケット部分を除く) として保守的に設定した。

(3) 線源スペクトル

線源は ORIGEN で評価した。(付 - 2 参照)

ガンマ線源のエネルギー分布を表付 3 - 1 に示す。これは付 - 2 に示す ORIGEN の結果を JSD 120 のガンマ線 20 群構造に変換したものである。

中性子線源については、各反応における中性子発生スペクトルが必ずしも明確ではないため、 Pu^{239} の核分裂スペクトルを暫定的に用い、これにより中性子発生総量を各エネルギー群ごとにわりあてた。この Pu^{239} の核分裂スペクトルを、JSD 100 の 100 群構造で表付 3 - 2 に示す。



図付 3 - 1 線量率解析一次元モデル
(Cylindrical Model)

表付 3 - 1 使用済燃料集合体ガンマ線源
(炉停止 2 年後)

単位 : r/sec/集合体

| JSD Cr | Actinide | Fission Products | Activation | Actinide & FP | Total |
|-----------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | 3.40×10^5 | | | 3.40×10^5 | " |
| 6 | 1.68×10^6 | | | 1.68×10^6 | " |
| 7 | 4.63×10^6 | 1.07×10^{10} | | 1.07×10^{10} | " |
| 8 | 3.79×10^7 | 3.36×10^{11} | | 3.36×10^{11} | " |
| 9 | 9.75×10^6 | 4.32×10^{12} | | 4.32×10^{12} | " |
| 10 | 2.01×10^7 | 1.92×10^{13} | 2.39×10^{-11} | 1.92×10^{13} | " |
| 11 | 3.84×10^7 | 3.23×10^{13} | 9.52×10^{10} | 3.23×10^{13} | 3.24×10^{13} |
| 12 | 9.89×10^{10} | 1.72×10^{14} | 1.28×10^{14} | 1.72×10^{14} | 3.00×10^{14} |
| 13 | | | | | |
| 14 | 3.94×10^{11} | 2.85×10^{15} | 1.07×10^{15} | 2.85×10^{15} | 3.92×10^{15} |
| 15 | | | | | |
| 16 | 1.57×10^{11} | 7.31×10^{14} | 3.27×10^9 | 7.31×10^{14} | " |
| 17 | 2.32×10^{11} | | | 2.32×10^{11} | " |
| 18 | 2.76×10^{11} | | | 2.76×10^{11} | " |
| 19 | 1.05×10^{13} | | | 1.05×10^{13} | " |
| 20 | 1.29×10^{13} | | | 1.29×10^{13} | " |
| 1~20 | 2.45×10^{13} | 3.81×10^{15} | 1.20×10^{15} | 3.83×10^{15} | 5.03×10^{15} |

注) JSD 120 タイプ群構造

表付3-2 中性子線源スペクトル

(Pu²³⁹ 核分裂スペクトル)

単位 n/発性中性子

| GR. | chi | GR. | chi |
|-----|------------|-----|------------|
| 1 | 2.2937E-04 | 51 | 3.4214E-03 |
| 2 | 3.4269E-04 | 52 | 2.3658E-03 |
| 3 | 6.9981E-04 | 53 | 1.6414E-03 |
| 4 | 1.3186E-03 | 54 | 1.1365E-03 |
| 5 | 2.3048E-03 | 55 | 7.8558E-04 |
| 6 | 3.7688E-03 | 56 | 5.4237E-04 |
| 7 | 5.7985E-03 | 57 | 3.7413E-04 |
| 8 | 8.4446E-03 | 58 | 2.5773E-04 |
| 9 | 1.1699E-02 | 59 | 1.7756E-04 |
| 10 | 1.5494E-02 | 60 | 1.2222E-04 |
| 11 | 1.9694E-02 | 61 | 8.4112E-05 |
| 12 | 2.4134E-02 | 62 | 5.7866E-05 |
| 13 | 2.8587E-02 | 63 | 3.9802E-05 |
| 14 | 3.2855E-02 | 64 | 2.7370E-05 |
| 15 | 3.6741E-02 | 65 | 1.8821E-05 |
| 16 | 4.0078E-02 | 66 | 1.2941E-05 |
| 17 | 4.2734E-02 | 67 | 8.8960E-06 |
| 18 | 4.4651E-02 | 68 | 6.1157E-06 |
| 19 | 4.5821E-02 | 69 | 4.2040E-06 |
| 20 | 4.6216E-02 | 70 | 2.8897E-06 |
| 21 | 4.5954E-02 | 71 | 1.9863E-06 |
| 22 | 4.5020E-02 | 72 | 1.3652E-06 |
| 23 | 4.3602E-02 | 73 | 9.3852E-07 |
| 24 | 4.1738E-02 | 74 | 6.4498E-07 |
| 25 | 3.9573E-02 | 75 | 4.4324E-07 |
| 26 | 3.7185E-02 | 76 | 3.0474E-07 |
| 27 | 3.4600E-02 | 77 | 2.0940E-07 |
| 28 | 3.2003E-02 | 78 | 1.4392E-07 |
| 29 | 2.9381E-02 | 79 | 9.8924E-08 |
| 30 | 2.6810E-02 | 80 | 6.7991E-08 |
| 31 | 2.4331E-02 | 81 | 4.6727E-08 |
| 32 | 2.1972E-02 | 82 | 3.1462E-08 |
| 33 | 1.9747E-02 | 83 | 2.2731E-08 |
| 34 | 1.7676E-02 | 84 | 1.5171E-08 |
| 35 | 1.5764E-02 | 85 | 1.0424E-08 |
| 36 | 1.4010E-02 | 86 | 7.1675E-09 |
| 37 | 1.2414E-02 | 87 | 4.9252E-09 |
| 38 | 1.0970E-02 | 88 | 3.3851E-09 |
| 39 | 9.6698E-03 | 89 | 2.3266E-09 |
| 40 | 8.5017E-03 | 90 | 1.5990E-09 |
| 41 | 7.4626E-03 | 91 | 1.0998E-09 |
| 42 | 6.5385E-03 | 92 | 7.6572E-10 |
| 43 | 5.7180E-03 | 93 | 5.0872E-10 |
| 44 | 4.9920E-03 | 94 | 3.5678E-10 |
| 45 | 4.3538E-03 | 95 | 2.4520E-10 |
| 46 | 3.7916E-03 | 96 | 1.6857E-10 |
| 47 | 3.2987E-03 | 97 | 1.1583E-10 |
| 48 | 2.8685E-03 | 98 | 7.9611E-11 |
| 49 | 2.4884E-03 | 99 | 5.4719E-11 |
| 50 | 4.8512E-03 | 100 | 1.2023E-10 |

注) JSD 100 タイプ群構造

付一 4 使用済燃料貯蔵キャスク除熱性評価手法

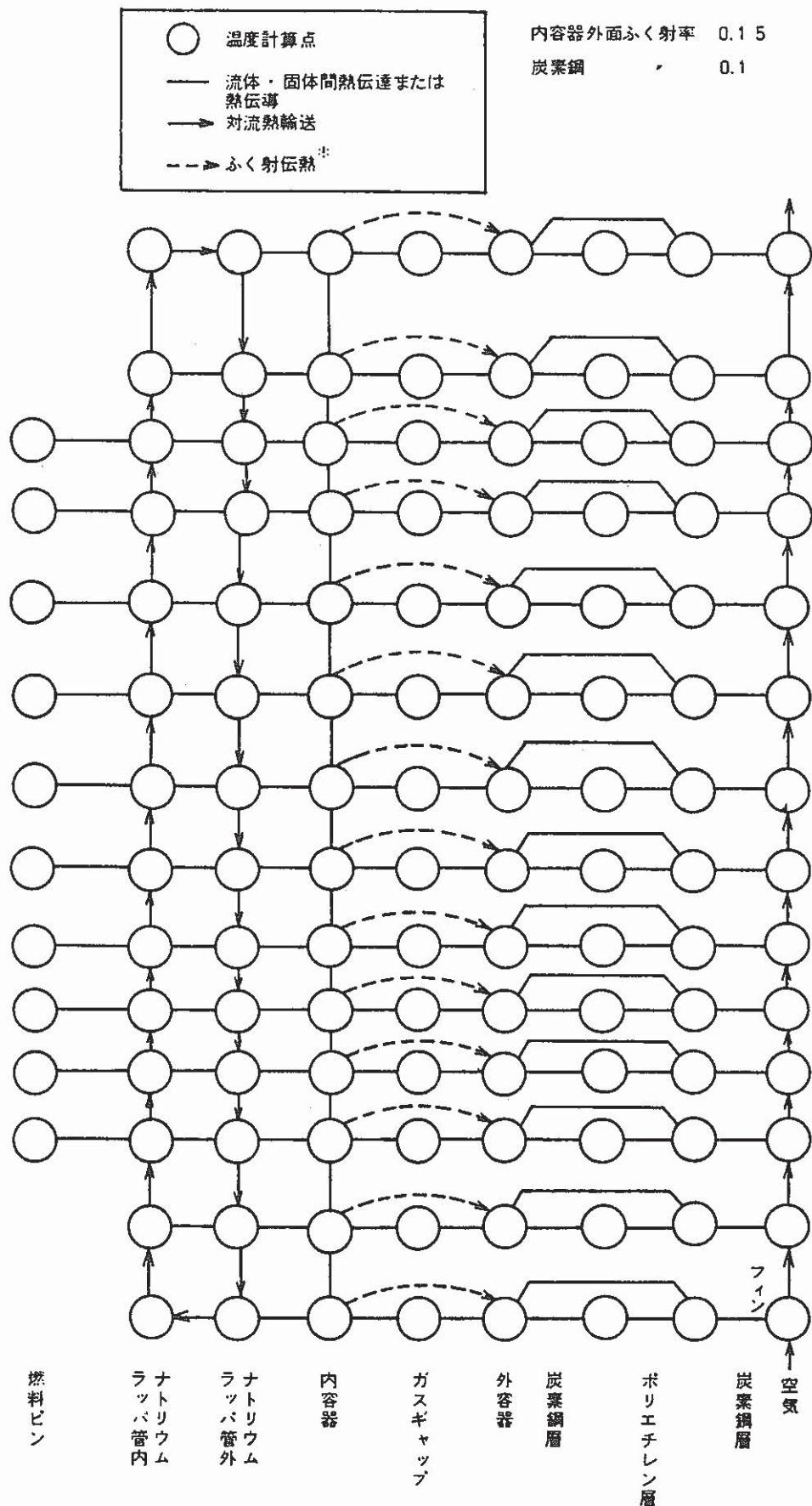
伝熱ネットワークモデルにより温度計算を行った。

図付 4-1 にモデル構成を示す。

内容器内は燃料ピン、ラッパ管内ナトリウム、ラッパ管外ナトリウムを各々径方向 1 ノードで代表させた。複数体の燃料収納時には N ($N > 1$) 体分の合計発熱率を有し、ナトリウム流路断熱積、ラッパ管側面伝熱面積が各々 1 体の燃料集合体での値の N 倍となる仮想燃料集合体を想定したうえで、図付 4-1 と同じモデル構成で計算した。このとき各一体の集合体内での径方向温度分布（中心部でピークが形成される）を考慮して、中心部ピン最高温度を求めたが、 N 体の集合体間の温度分布については、内容器内のナトリウムの温度混合が充分大きいと仮定し、無視した。

また、主な入力条件と設定根拠を表付 4-1 に示す。

解析に使用したコードは“TRUMP”である。本コードの概要を表付 4-2 に示す。



図付 4-1 キャスク除熱体系の解析モデル

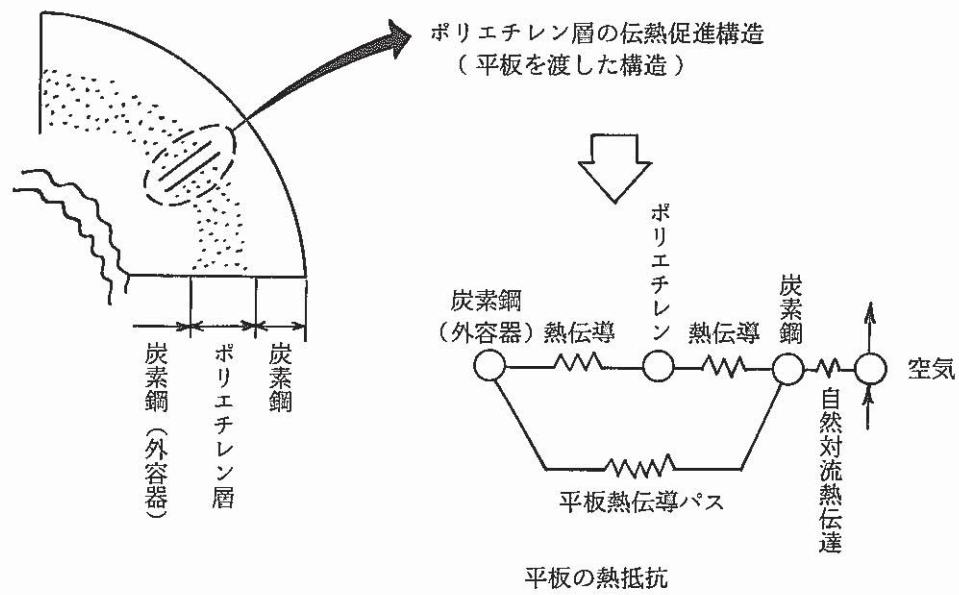
表付 4-1 キャスク除熱性検討主要入力データ

| 項目 | データ・計算式 | 出典・根拠 |
|---------------------------|--|--|
| 構造材熱伝導率 | ステンレス鋼 : 14 kcal/mh °C 炭素鋼 : 46 kcal/mh °C ポリエチレン : 0.22 kcal/mh °C | 「伝熱工学資料」(JSME) " 「原子炉材料ハンドブック」 (日刊工業) |
| 液体の熱物性値 | ナトリウム : 温度依存 ヘリウム : " 空気 : " | ANL-7323 「流体の熱物性値集」(JSME) " |
| 構造材輻射率 | ステンレス鋼 : 0.15 炭素鋼 : 0.1 (温度 260 °Cでの) 鋼研磨面 | 原子力学会「S59秋」 予稿集 甲藤：「伝熱概論」(養賢堂) |
| フィンの効率 | $\eta = \tanh(mH) / mH$ (実効伝面增加率) $m = \sqrt{2\alpha / (\lambda_f b)}$ $\begin{cases} H & : フィン高さ (= 0.15 m) \\ \lambda_f & : フィン材の熱伝導率 \\ & (= 46 \text{ kcal/mh } ^\circ\text{C}) \\ b & : フィン厚さ (= 0.005 m) \\ \alpha & : 熱伝導率 \end{cases}$ | 甲藤：「伝熱概論」(養賢堂) |
| キャスク外面と 冷却空気間の熱 伝導率 | $\alpha = 1.7 \times (T_s - T_A)^{0.25}$ $\begin{cases} \alpha & : 伝熱導率 (kcal/mh °C) \\ T_s & : キャスク外表面温度 (°C) \\ T_A & : 周囲空気温度 (°C) \end{cases}$ | ギート：「基礎伝熱工学」 (丸善) |

表付 4-2 TRUMP コードの概要

| コード名称 | T R U M P |
|--------|---|
| 来歴 | 米国ローレンス・リバモア研究所で作成された公開コード (TID = 4500 , UC - 32 , "TRUMP : A COMPUTER PROGRAM FOR TRANSIENT AND STEDY-STATE ... ") |
| 用途 | 任意領域で任意の初期条件・境界条件による定常および非定常の伝熱、温度分布を計算する。伝熱モードとしては熱伝導、対流熱伝達及びふく射を扱うことができる。 |
| 基礎式 | $\rho C \frac{DT}{Dt} = \nabla (k \nabla T) + G$ $\left. \begin{array}{l} T : \text{温度}, t : \text{時間}, \rho : \text{密度}, C : \text{比熱}, \nabla : \text{勾配}, k : \text{熱伝導率}, \\ G : \text{熱生成率} \end{array} \right\}$ <p>＜物質間の境界における熱収支＞</p> $k \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_s = U_{s,b} \cdot (T_b - T_s)$ $U_{s,b} = \frac{h_{s,o}}{\text{接触}} + \frac{h_{s,c} [(T_b - T_s)^2]^{ps/2}}{\text{自然/強制対流}} + \frac{\sigma F_b (T_s + T_b) (T_s^2 + T_b^2)}{\text{ふく射}}$ $\left. \begin{array}{l} r : \text{座標成分}, T_b : \text{外部境界温度}, T_s : \text{表面温度} \\ F_b : \text{ふく射交換係数}, h_{s,o} : \text{接触熱通過率} \\ h_{s,c} : \text{対流熱通過率}, \sigma : \text{ステファンボルツマン定数} \end{array} \right\}$ |
| モデリング | 全体を部分領域に分割し、各部分領域の代表点をノードと呼び、ノード間の伝熱モード、熱伝達率、ふく射変換係数等を与える。 |
| アウトプット | 各ノードにおける温度（時間変化）、各伝熱モード毎の伝熱量等。 |
| 備考 | 流れは1次元として扱い、流量を入力する。 |

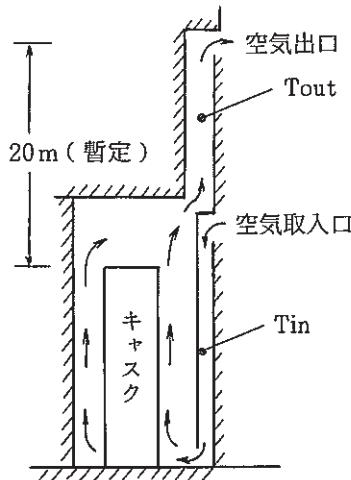
付一5 ナトリウムキャスク内ボロン入りポリエチレン層の伝熱促進構造伝熱モデル



$$R = \frac{d}{\lambda_{\text{炭素鋼}}} = \frac{0.15 \text{ m}}{46 \text{ Kcal/mh}^{\circ}\text{C}}$$

$$= 3.3 \times 10^{-3} (\text{m}^2 \text{h}^{\circ}\text{C}/\text{Kcal})$$

付一6 ナトリウムキャスク EVS 方式における自然通風量計算



(1) 空気入口側ダクト内の空気温度は32°C

空気出口ダクト内の空気温度は

$$T_{\text{out}} = 32 \div \frac{Q \times 860}{C_p \cdot G} \quad (\text{°C})$$

$$\left. \begin{array}{l} Q : \text{キャスク内貯蔵燃料の全発熱率 (kW)} \\ G : \text{空気自然通風量 (kg/h)} \\ C_p : \text{空気比率 (kcal/kg °C)} \end{array} \right)$$

として、 $\Delta P_{\text{NC}} = \int \gamma dH$ を求める。(G の関数)

(2) 一方、流動抵抗は、ダクトの等価円管内の摩擦抵抗と、流路急拡大・急縮小の形状抵抗の和としてムーディ線図等により ΔP_R を求める。

(ダクト寸法は 2 m × 1 m と暫定した。また、ダクトの急拡大・急縮小は各々 3 回仮定した。)

(3) G の関数の形での ΔP_{NC} と ΔP_R を等しいとおいて

$$\Delta P_{\text{NC}}(G) = \Delta P_R(G)$$

を繰り返し計算により解き、G を求めた。

付一7 移送ポットの熱容量

(1) 計算式

$$C = \sum C_p \cdot \gamma \cdot V \quad (C: \text{熱容量}, C_p: \text{比熱}, \gamma: \text{比重}, V: \text{体積})$$

(2) 数値データ（500 °Cでの物性値で代表）

① ステンレス鋼（燃料集合体、被ふく管、ポット：SUS 316 の物性値で代表）

$$C_p = 0.136 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}, \gamma = 7750 \text{ kg/m}^3, V = 0.0202 \text{ m}^3$$

② ナトリウム

$$C_p = 0.31 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}, \gamma = 832 \text{ kg/m}^3, V = 0.171 \text{ m}^3$$

③ UO₂（ブランケット）

$$C_p = 0.078 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}, \gamma = 10960 \text{ kg/m}^3, V = 0.00684 \text{ m}^3$$

④ (Pu-U)O₂（炉心燃料）

$$C_p = 0.078 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}, \gamma = 10990 \text{ kg/m}^3, V = 0.0114 \text{ m}^3$$

(3) 上記により計算された値 $C = 81 \text{ kcal/}^\circ\text{C}$ に 10 % 余裕を見込んで丸めた値 $C = 70 \text{ kcal/}^\circ\text{C}$ をとった。

付一 8 ナトリウムポット EVS 方式実効増倍率の計算手法

(1) 解析手順

実効増倍率の解析手順を図付 8 - 1 に示す。

i) 断面積作成

臨界安全評価用の 218 群断面積ライブラリー CSRL の共鳴処理を AMPX を用いて行い、 218 群マクロ断面積を作成した。これを用いて燃料ピンのピンセルに対する 1 次元輸送計算 (ANISN P₁, S₄) を行い、 27 群の縮約マクロ断面積を作成した。ラップ管、移送ポット、保持筒等についても同様の手法により縮約断面積を作成した。

ii) 実効増倍率計算

モンテカルロコード MULTI-KENO による 3 次元計算と 1 次元輸送 ANISN 計算 (P₁, S₄) により行った。

(2) 解析モデル

i) ピンセル計算

ピンセルの 1 次元計算モデル図付 8 - 2 に示す。

ii) 1 次元計算

この計算は、保持筒内ナトリウムポット EVS 方式に対して、配列ピッチ、水密度の実効増倍率に及ぼす効果をサーベイし、3 次元計算で検討する条件を設定する目的で行う。

計算モデルを図付 8 - 3 に示す。燃料部、移送ポットまでのラップ管と Na 部、移送ポット、Ar ガスと保持筒で夫々均質化し、層状に配列する。横方向にはこのセルの無限配列を仮定する。燃料長は、ブランケット上、下 30cm を考慮し、保守的評価となるように 160 cm とした。

iii) 3 次元計算

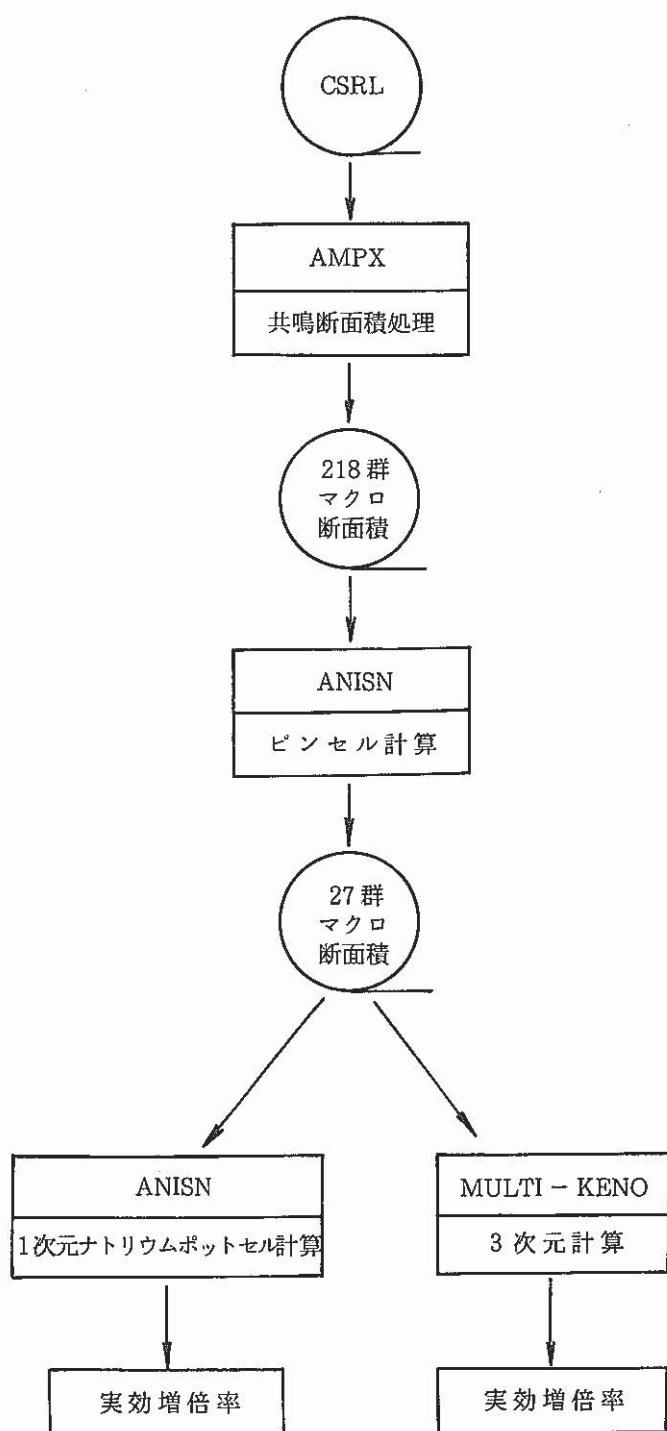
この計算による実効増倍率により臨界性評価を行う。

計算モデルを保持筒内ナトリウムポット EVS 方式、Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式について夫々図付 8 - 4, 図付 8 - 5 に示す。

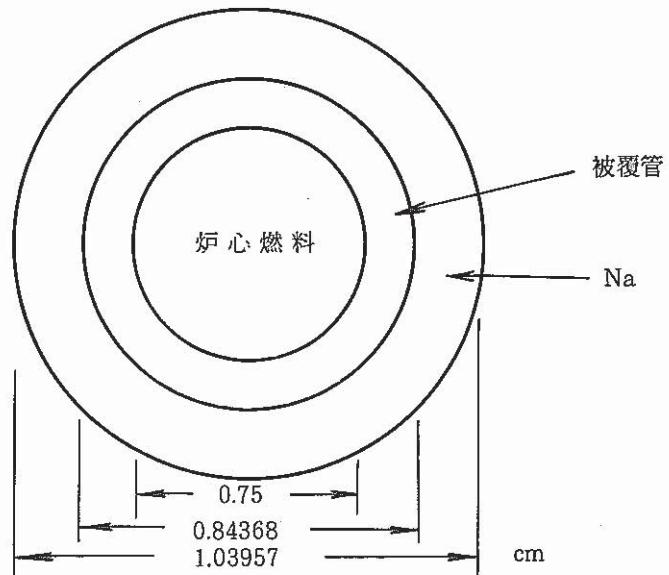
燃料長は 160 cm とし安全側とした。燃料集合体のうち、端栓部、遮蔽体等の部分は SUS60 v/o, Na 40 v/o から成るとし、高さ 115 cm とした。縦方向には燃料中心に対し、上下対称とした。

ナトリウムポットは 13 体 × 13 体 正方配列とした。燃料取扱機寄り付き 60cm、及びコンクリート壁を考慮した。

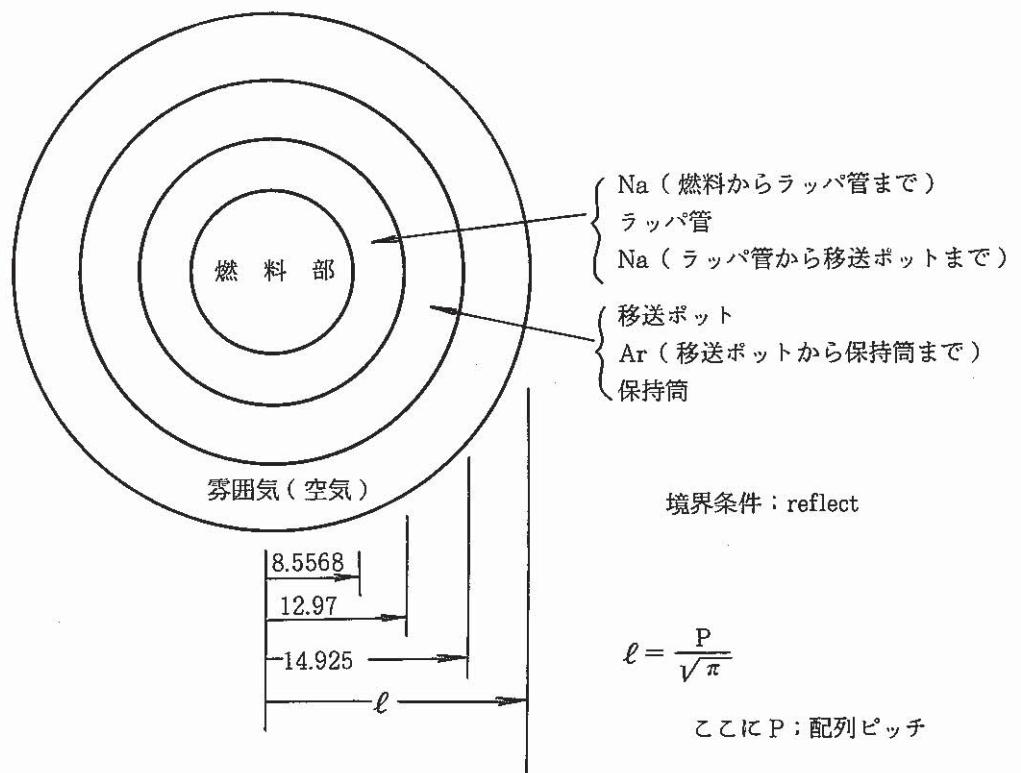
なお、縦方向にも横方向と同厚のコンクリート壁を仮定した。



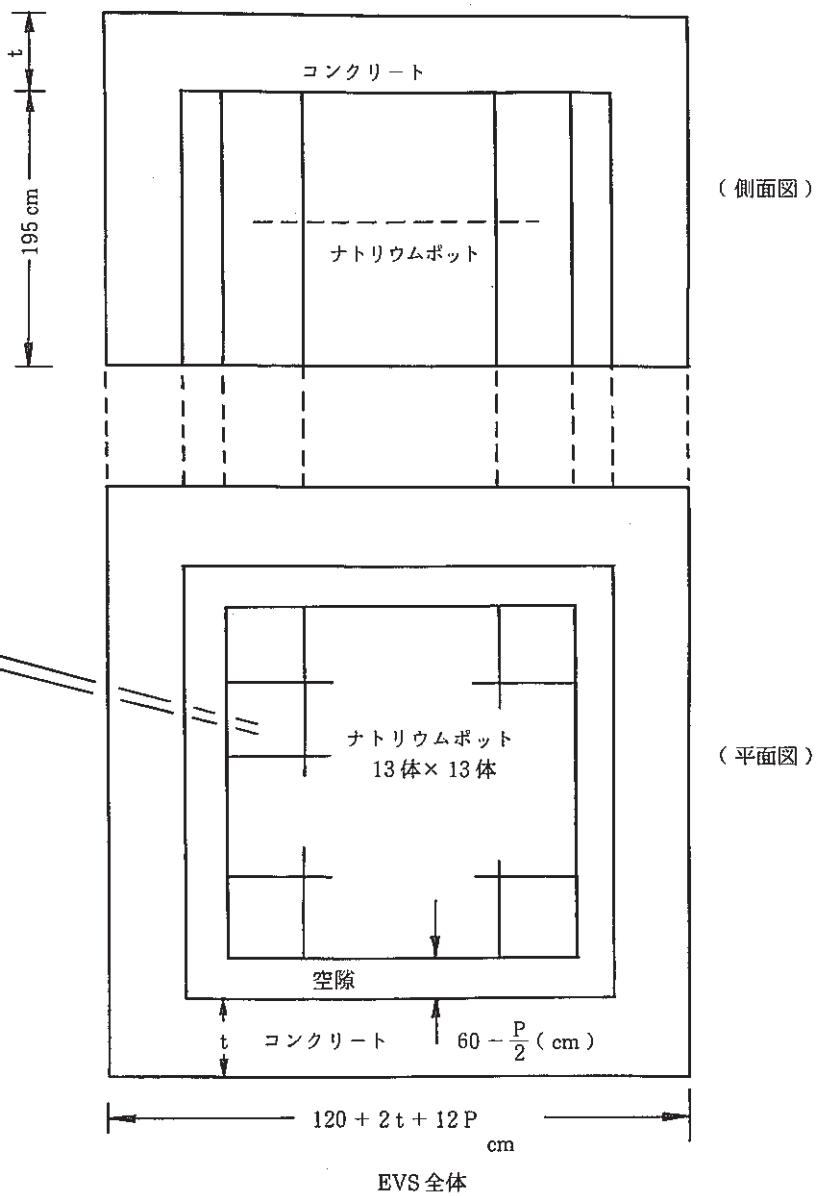
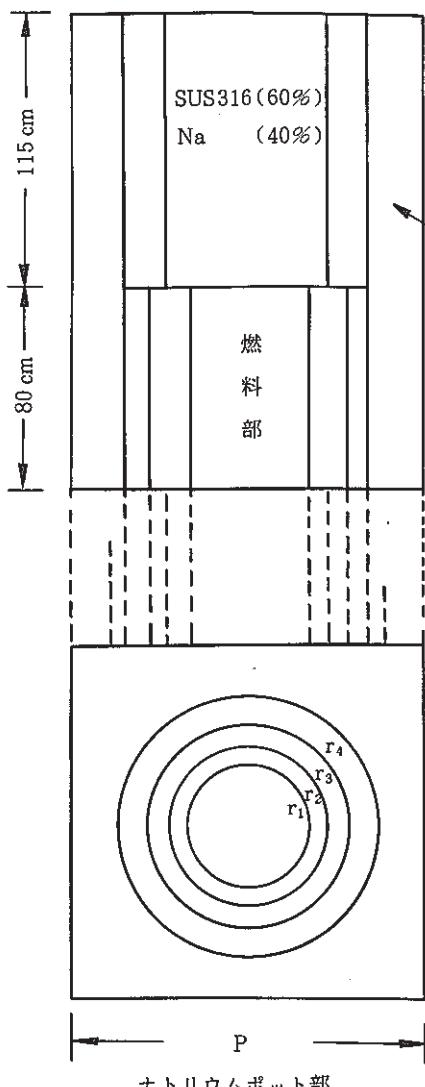
図付 8 - 1 実効増倍率解析手順



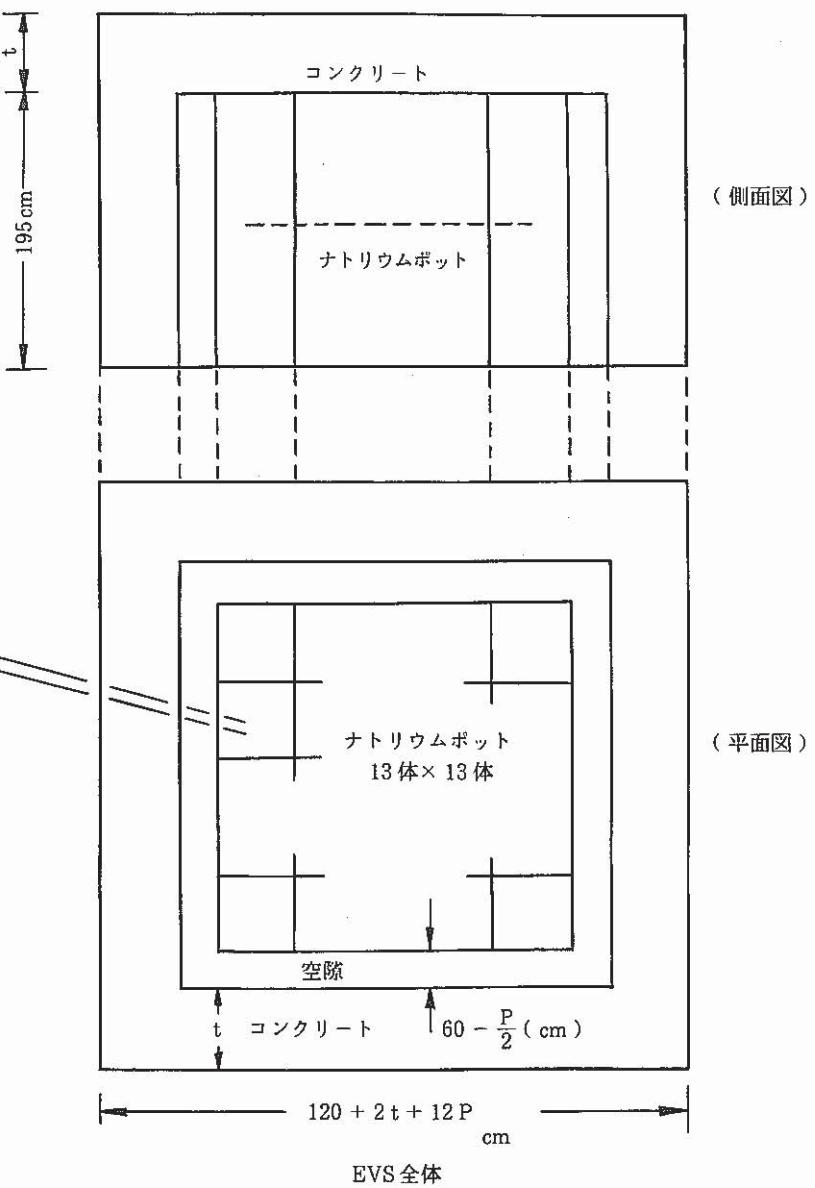
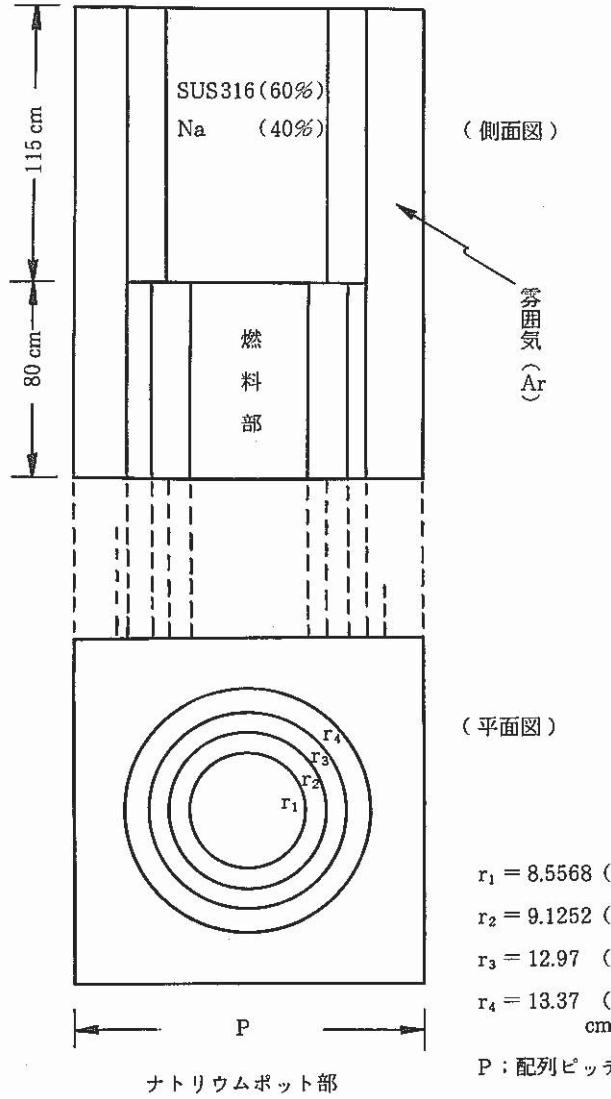
図付 8 - 2 ピンセル計算モデル



図付 8 - 3 ナトリウムポットセル計算モデル(保持筒内貯蔵方式)



図付 8-4 保持筒内ナトリウムポット EVS 方式 3 次元解析モデル



図付 8-5 Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式 3 次元解析モデル

付一 9 Arガスセル壁線量率計算手法

(1) 計算方法

中性子及びガンマ線の線量率を一次元輸送コード ANISIN による計算から求める (P3-S 8 近似)。中性子 100 群、ガンマ線 20 群の輸送断面積は、JSD 100 および POPOP 4 ライブライナーを RAHEAT-V 3 コードで処理したもの用いた。

(2) 解析モデル

(イ) 周辺側壁

燃料貯蔵セル内の集合体は全て炉心燃料とし、最大限 169 体 (13 体 × 13 体) が収納されたとした。解析モデルは径方向 1 次元形状とし、貯蔵セル内の各領域の面積を保存させた。モデルを図付 9-1 に示す。

集合体の単位高さ当たりの線源強度は、線源高さを 1 m と保守的に設定した。

(ロ) Ar ガスセル天井壁

① Ar ガスセル内ナトリウムポット EVS 方式

解析モデルは単位集合体セルを各軸方向領域ごとに均質化した無限平板形状とした。モデルを図付 9-2(a) に示す。天井壁と燃料集合体間の空間は平板モデルであることから無視した。

軸方向の線源強度は、炉心及びブランケット燃料部に一様に分布していると仮定した。

② 保持筒内ナトリウムポット EVS 方式

燃料貯蔵時には、①と同様なモデル化を行った。Ar ガスセルの空間は平板モデルであることから無視した。

燃料取扱時には、Ar ガスセルに存在する燃料集合体 1 体分の寄与を別途解析する必要がある。このため燃料集合体と遮蔽体との距離 (ブランケット部先端と天井壁との距離) 3.65 m 離れた径方向 1 次元モデルを設定した。

これらの解析モデルを図付 9-2(b) に示す。

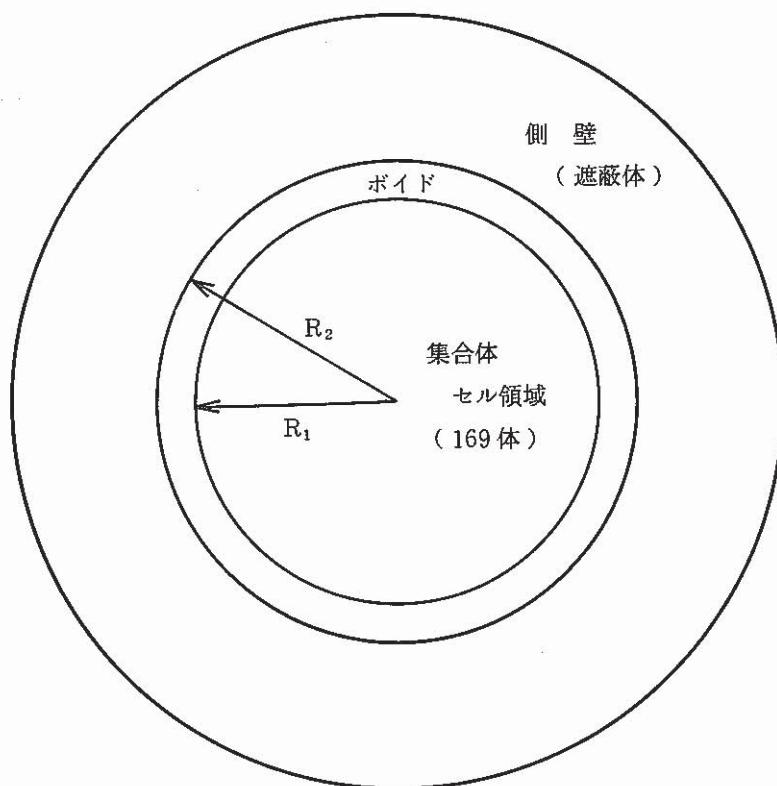
(3) 線源スペクトル

線源は ORIGEN で評価した (ORIGEN 結果: 付-2 参照)

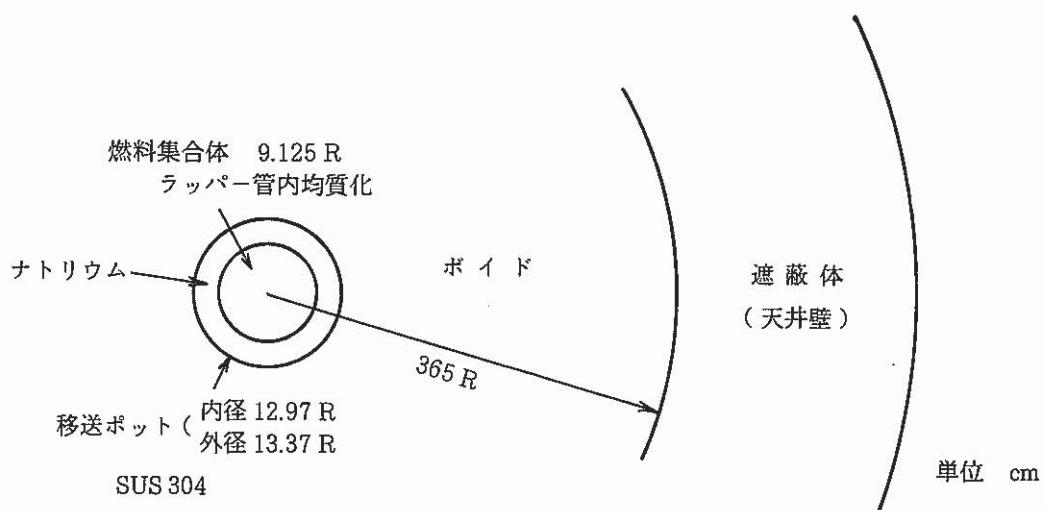
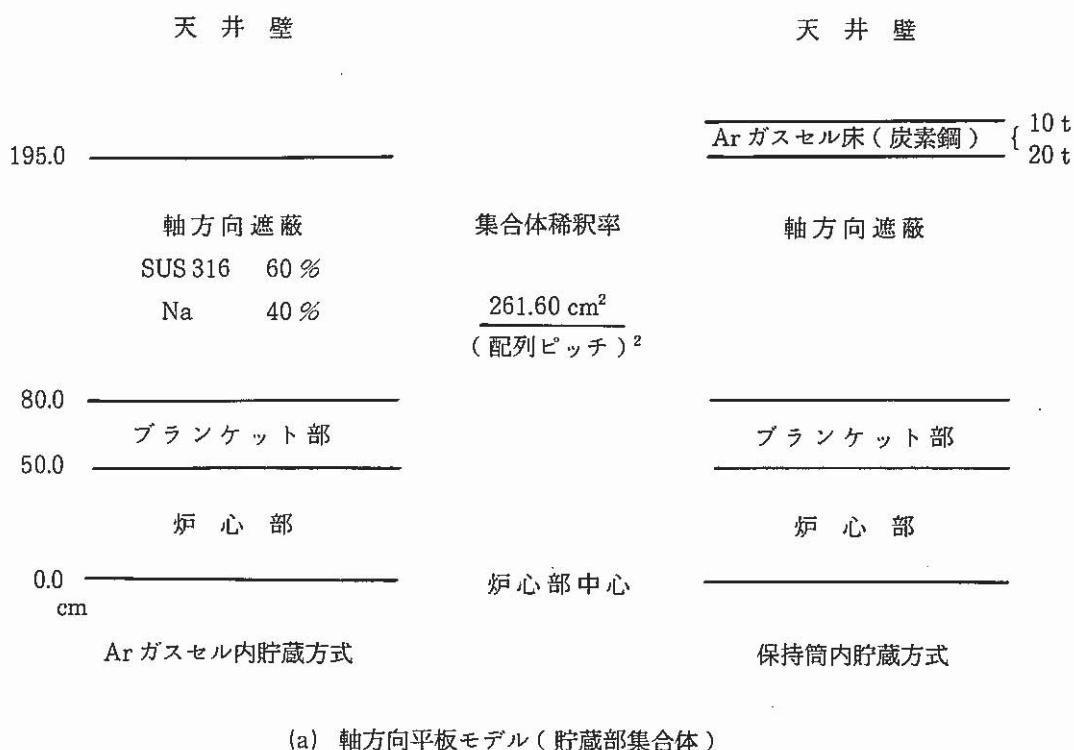
ガンマ線源のエネルギー分布を表付 9-1 に示す。これは ORIGEN の結果を JSD120 のガンマ線 20 群構造に変換したものである。

中性子線源については、各反応における中性子発生スペクトルが必ずしも明確ではないため、 Pu^{239} の核分裂スペクトルを暫定的に用い、これにより中性子発生総量を各エネルギー群ごとにわりあてた。この Pu^{239} の核分裂スペクトルは、JSD 100 の 100 群構造で表付 3-2 に示した。

| 集合体配列ピッチ | | R_1 | R_2 | |
|----------|----|--------|--------|--|
| 30 | cm | 220.03 | 270.81 | $R_1^2 = (\text{ピッチ} \times 13)^2 / \pi$ |
| 40 | cm | 293.38 | 338.51 | $R_2^2 = (\text{ピッチ} \times 12 + 60 \times 2)^2 / \pi$ |
| 50 | cm | 366.72 | 406.22 | |



図付 9-1 側壁遮蔽解析モデル



図付 9-2 天井壁遮蔽解析モデル

表付 9 - 1 使用済燃料集合体ガンマ線源

(炉停止 7 日後)

単位 $\gamma/\text{sec}/\text{集合体}$

| JSD Gr | Actinide | Fission Products | Activation | Actinide & FP | Total |
|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | 8.98×10^5 | | | 8.98×10^5 | 8.98×10^5 |
| 6 | 4.45×10^6 | | | 4.45×10^6 | 4.45×10^6 |
| 7 | 1.22×10^6 | 4.24×10^{10} | 3.30×10^{-7} | 4.24×10^{10} | 4.24×10^{10} |
| 8 | 2.01×10^7 | 1.31×10^{12} | 4.00×10^3 | 1.31×10^{12} | 1.31×10^{12} |
| 9 | 2.57×10^7 | 4.14×10^{14} | 1.88×10^{-6} | 4.14×10^{14} | 4.14×10^{14} |
| 10 | 5.17×10^7 | 2.73×10^{14} | 5.20×10^{10} | 2.73×10^{14} | 2.73×10^{14} |
| 11 | 1.05×10^8 | 1.29×10^{15} | 1.07×10^{14} | 1.29×10^{16} | 1.30×10^{16} |
| 12 | 2.35×10^{13} | 4.31×10^{15} | 4.13×10^{14} | 4.31×10^{15} | 4.72×10^{15} |
| 13 | | | | | |
| 14 | 7.14×10^{14} | 8.24×10^{16} | 3.09×10^{16} | 8.31×10^{15} | 1.14×10^{17} |
| 15 | | | | | |
| 16 | 5.46×10^{15} | 2.42×10^{16} | 3.01×10^{14} | 2.97×10^{16} | 3.00×10^{16} |
| 17 | 7.91×10^{15} | | | 7.91×10^{15} | 7.91×10^{15} |
| 18 | 1.03×10^{16} | | | 1.03×10^{16} | 1.03×10^{16} |
| 19 | 1.43×10^{16} | | | 1.43×10^{16} | 1.43×10^{16} |
| 20 | 8.40×10^{15} | | | 8.40×10^{15} | 8.40×10^{15} |
| 1~20 | 4.72×10^{16} | 1.24×10^{17} | 3.18×10^{16} | 1.71×10^{17} | 2.03×10^{17} |

注) JSD 120 タイプ 群構造用

付一 10 ナトリウムポット貯蔵方式除熱性評価

TRUMP を用いた伝熱ネットワークモデルにより温度分布計算を行った。各方式のモデル構成を以下に示す。

(1) Ar ガスセル内貯蔵方式

自然循環 図付10-1

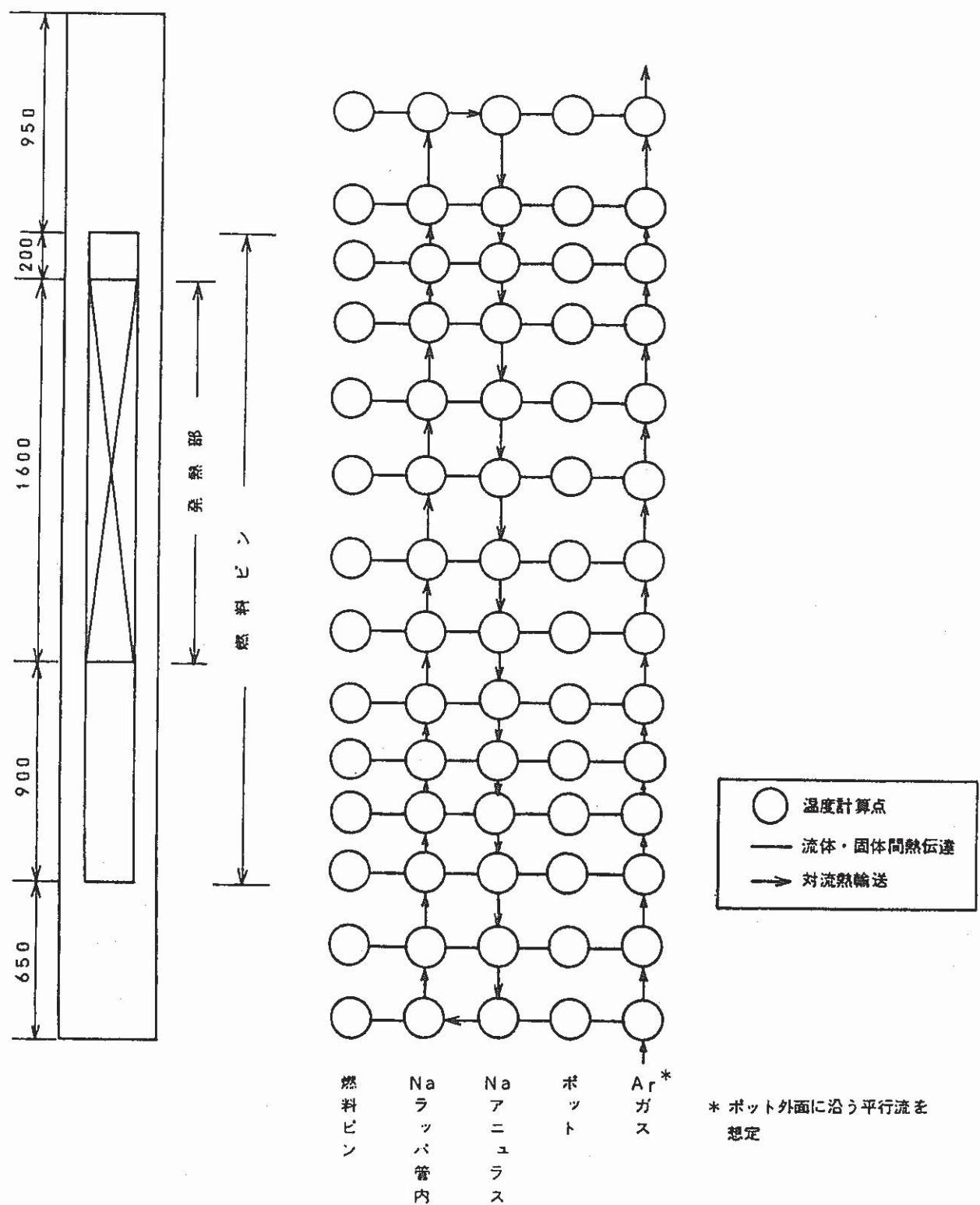
強制循環 図付10-2

(2) 保持筒内貯蔵方式

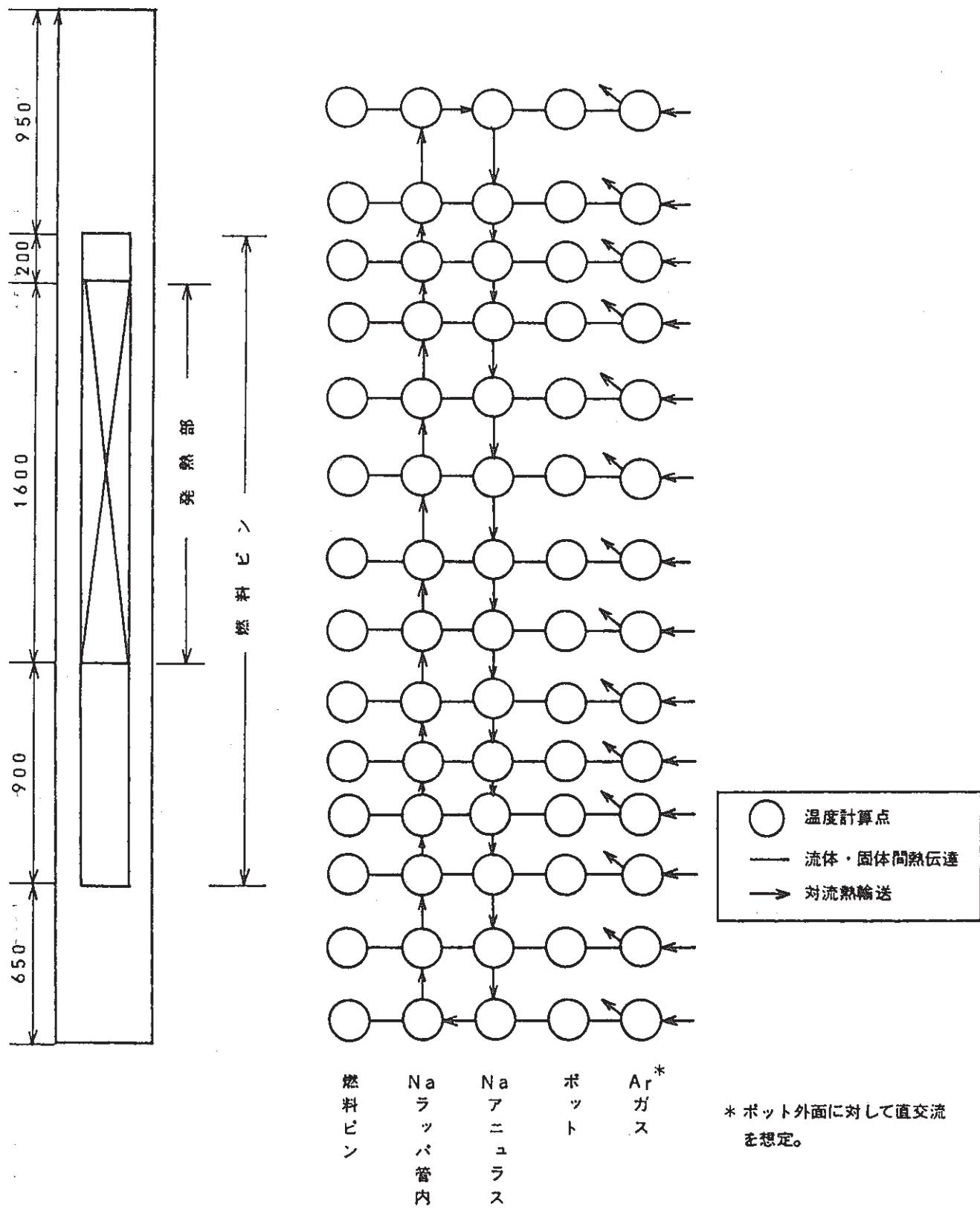
自然通風 図付10-3

強制通風 図付10-4

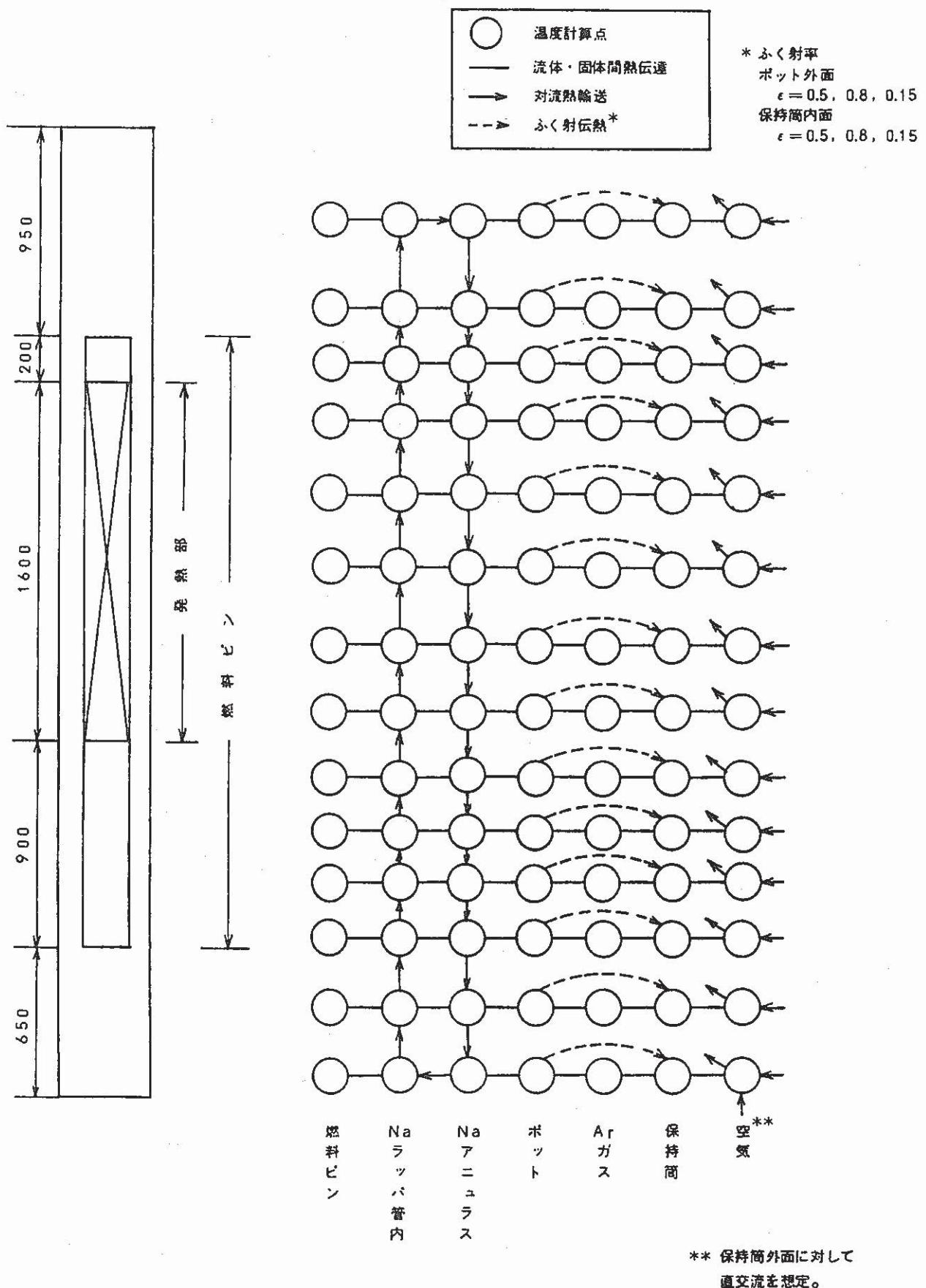
また使用した主な入力データと計算式を表付10-1に示す TRUMP については付 4-3 参照。

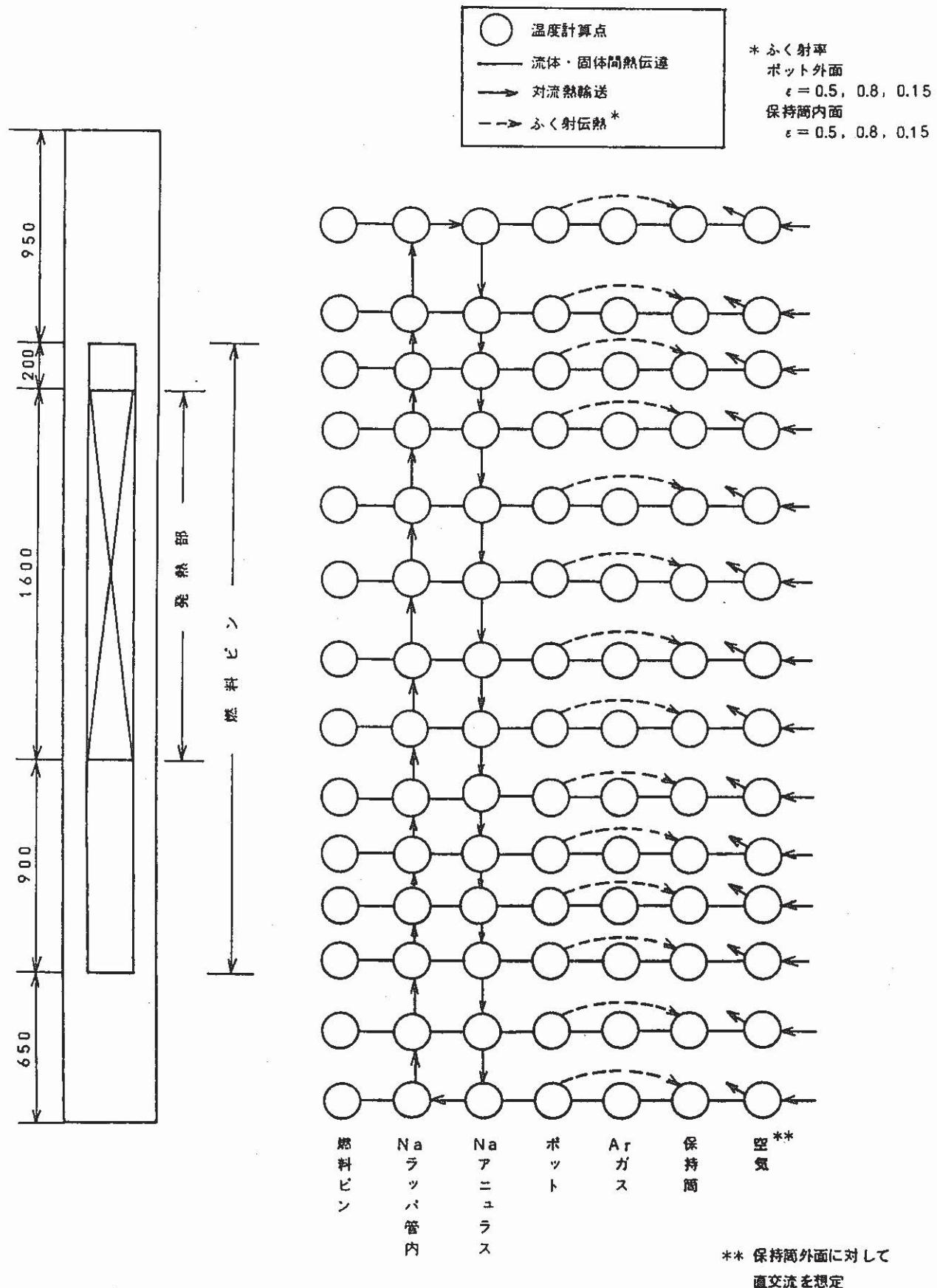


図付 10-1 Ar ガスセル内貯蔵方式 自然循環冷却計算モデル



図付 10-2 Ar ガスセル内貯蔵方式 強制循環冷却計算モデル





図付 10-4 保持筒内貯蔵方式 強制循環冷却計算モデル

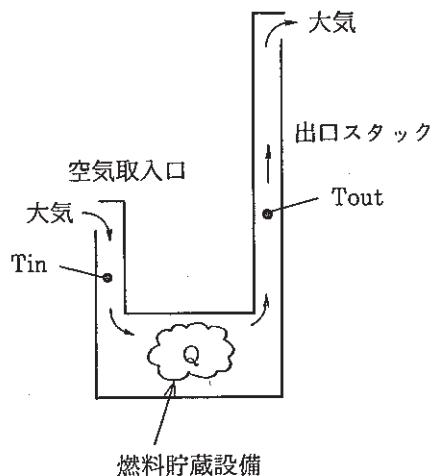
表付 10-1 主要入力データおよび計算式(1/2)

| 項目 | データ、計算式 | 出典、根拠 |
|-------------|---|---|
| 流体熱物性値 | ナトリウム：温度依存 アルゴンガス：" " 空 気：" " | ANL-7323 「流体の熱物性値集」 (JSME) " |
| 構造材 熱伝達率 | スレンレス鋼：14 kcal/mh °C | 「伝熱工学資料」 (JSME) * 温度依存性は結果に対して影響小さい。 |
| 熱伝達率 | <p>① Arガスセル貯蔵方式 ポット・アルゴンガス間</p> <ul style="list-style-type: none"> 自然通風時(垂直円筒自然対流) $\alpha = 0.94 \Delta T^{0.25}$ $\left[\begin{array}{l} \alpha : \text{熱伝達率 (kcal/m^2 h °C)} \\ \Delta T : \text{ポット表面 - 周囲 Ar の温度差 (°C)} \end{array} \right]$ 強制通風時(管群直交流) $Nu = 0.4 \times Re^{0.6} Pr^{0.36}$ D_{max} $\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda_{Ar}}{D}$ $\left[\begin{array}{l} \alpha : \text{熱伝達率 (kcal/m^2 h °C)} \\ Re_{D_{max}} : \text{管群の最狭間隙での空気流速によるレイノルズ数} \\ Pr : \text{Ar プラントル数} \\ \lambda_{Ar} : \text{Ar 熱伝導率 (kcal/m h °C)} \\ D : \text{ポット外径 (°C)} \end{array} \right]$ | ギード「基礎伝熱工学」 (丸善) 空気の自然対流の式に熱伝導率 $\lambda_{Ar}/\lambda_{空気}$ の補正を加えた簡易評価式。 「伝熱工学資料」 A. Zukauskas の簡易式 * Pr/Pr_{rw} の効果は無視(Pr の温度依存性は小さい) |

表付 10-1 主要入力データおよび計算式(2/2)

| 項 目 | デ ー タ , 計 算 式 | 出 典 , 根 拠 | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|----------------------|------------|----------|----------------|-----|---------|-----------|------------------------|--------|---|--------------------------------|--|--------------------------------|--|---|
| | <p>② 保持筒内貯蔵方式 自然通風時, 強制通風時とも管群直交流。 ①の強制通風時と同じ A. Zukauskas の簡易式を使用。ただし, 物性値は空気。</p> | 「伝熱工学資料」 | | | | | | | | | | | | | | |
| 流 動 抵 抗 | <p>① 流路摩擦抵抗係数 (空気) $f = f (Re)$: レイノルズ数依存 ムーディ線図による。</p> <p>② 管群直交流の流動抵抗 保持筒内貯蔵方式の自然通風量計算に適用。</p> $\Delta P = N_L \cdot X \cdot \left(\frac{\gamma}{2g} V_{max}^2 \right) \cdot f$ <table style="margin-left: 100px; border-left: 1px solid black; padding-left: 10px;"> <tr> <td>N_L</td> <td>: 流れ方向の管列数</td> </tr> <tr> <td>γ</td> <td>: 空気比重 (kg/m³)</td> </tr> <tr> <td>g</td> <td>: 重力加速度</td> </tr> <tr> <td>V_{max}</td> <td>: 管群の最狭間隙部での空気流速 (m/s)</td> </tr> <tr> <td>X, f</td> <td>: $Re_{D,max}$, 配列ピッチ, 管外径に依存する係数 (出典参照)</td> </tr> <tr> <td>$Re_{D,max} = V_{max,D} / \nu$</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">(D : 保持筒外径, ν : 動粘性係数)</td> </tr> </table> | N_L | : 流れ方向の管列数 | γ | : 空気比重 (kg/m³) | g | : 重力加速度 | V_{max} | : 管群の最狭間隙部での空気流速 (m/s) | X, f | : $Re_{D,max}$, 配列ピッチ, 管外径に依存する係数 (出典参照) | $Re_{D,max} = V_{max,D} / \nu$ | | (D : 保持筒外径, ν : 動粘性係数) | | Incropera Dewitt "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 第2版, (John Wiley and Sons) |
| N_L | : 流れ方向の管列数 | | | | | | | | | | | | | | | |
| γ | : 空気比重 (kg/m³) | | | | | | | | | | | | | | | |
| g | : 重力加速度 | | | | | | | | | | | | | | | |
| V_{max} | : 管群の最狭間隙部での空気流速 (m/s) | | | | | | | | | | | | | | | |
| X, f | : $Re_{D,max}$, 配列ピッチ, 管外径に依存する係数 (出典参照) | | | | | | | | | | | | | | | |
| $Re_{D,max} = V_{max,D} / \nu$ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| (D : 保持筒外径, ν : 動粘性係数) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | <p>③ ベンド形状抵抗 直角エルボ $\zeta = 1.13$ (滑らかな面)</p> | 「機械工学便覧」 (JSME) | | | | | | | | | | | | | | |

付一 11 保持筒内貯蔵方式における自然通風量の計算



(1) 空気入口側ダクト内の空気温度は32°C

空気出口スタック内の空気温度は

$$T_{out} = 32 \div \frac{Q \times 860}{C_p \cdot G} \quad (\text{°C})$$

$$\left. \begin{array}{l} Q : 貯蔵部燃料全発熱率 (kW) * \\ G : 空気通風量 (kg/h) \\ C_p : 空気比率 (kcal/kg \text{ °C}) \end{array} \right\}$$

として、 $\Delta P_{nc} = \int \gamma dH$ を求める。(G の関数)

(γ : 空気比重 (kg/m³), H : 各部高さ (m))

(2) 一方、表 4.2 - 6 記載の流動抵抗の式により ΔP_R を求める。(G の関数)(3) G の関数の形での ΔP_{nc} , ΔP_R を等しいとおいて、

$$\Delta P_{nc}(G) = \Delta P_R(G)$$

を繰り返し計算により解き、G を求める。

* 貯蔵部燃料の全発熱率は次式で計算した。

$$Q = Q_{max} \times 119 \text{ 体} + Q_B \times 38 \text{ 体}$$

 Q_{max} : 最高発熱率/体；炉心燃料 Q_B : 同時期におけるブランケット燃料の発熱率/体

付一 12 吸排気ダクト必要屈曲数評価

保持筒内貯蔵方式において、遮蔽壁を貫通する大口径吸排気ダクトを通じての放射線ストリーミングを遮蔽するため、当ダクトに必要な屈曲数を評価した。

(i) 設備評価条件

ダクト構成概念図を図 4.4-10 に示す。

ダクト出口での設計線量率は次のように設定する。

排気ダクト出口(図 4.4-10, 評価点 A) : 0.625 mrem/hr

吸気ダクト入口(図 4.4-10, 評価点 B) : 0.625 mrem/hr

または 1 mrem/hr

上記線量率に安全ファクターとして 1/3 を考慮したものを目標線量率とする。

(ii) ダクトストリーミング評価式

当吸排気ダクトでのストリーミング評価には次式を適用する。

$$\phi(Z_n) = \frac{1}{2} \phi_0 \left(\frac{R_1}{Z_1} \right)^2 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{R_2}{Z_2} \right) \frac{\alpha(f)}{\sin \theta_1} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{R_3}{Z_3} \right)^2 \frac{\alpha(f)}{\sin \theta_2} \right] \cdots \left[\frac{1}{2} \left(\frac{R_n}{Z_n} \right)^2 \frac{\alpha(f)}{\sin \theta_{n-1}} \right] \right]$$

$\phi(Z_n)$: n 脚円筒ダクト出口線束

ϕ_0 : ダクト入口余弦分布線源強度

R_i, Z_i : i 脚目のダクト半径および長さ

θ : i 脚目と (i + 1) 脚目の屈曲ダクト間の角度

$\alpha(f)$: ダクト壁面アルベド

当式は高速中性子に適用されるものである。しかし、次に述べるように吸排気ダクトに入射する線源はガンマ線が支配的であり高速中性子と同様な前方透過特性を有しており、また式の上で線源の角度分布に余弦が仮定されていることから、壁面アルベドを最も大きく設計しておけば、当式により保守的評価が行えると考えられる。

ダクトを構成するコンクリートのアルベドとして、0.2 Mev ガンマ線に対応する値よりさらに大きな $\alpha(f) = 0.2$ とした。また本来のダクトは矩形断面であるが、上式を適用するために、断面が等価な円筒ダクトとみなして R を評価した。図 4.4-10 の具体的形状において上式は次のようになる。

ここで n は追加屈曲数を示す。

$$(排気ダクト) \phi_{out} = \phi_0 \frac{1}{2} \left(\frac{1.38}{4.25} \right)^2 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{1.38}{3.5} \right)^2 0.2 \right\}^{n-1} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{1.38}{35} \right)^2 0.2 \right\}$$

$$\therefore \phi_{out} = \phi_0 \times 8.20 \times 10^{-6} \times 0.0155^{n+1} \quad (1)$$

$$(吸気ダクト) \phi_{in} = \phi_0 \frac{1}{2} \left(\frac{1.20}{4.5} \right)^2 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{2.19}{6} \right)^2 0.2 \right\} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{1.38}{3.5} \right)^2 0.2 \right\}^n \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{1.54}{5.75} \right)^2 0.2 \right\}$$

1) J. G. Yevick (Ed.) : Fast Reactor Technology, Plant Design, MIT Press (1966)

$$\therefore \phi_{in} = \phi_0 \times 3.40 \times 10^{-5} \times 0.0155^n \quad (2)$$

(iii) ダクト入口線源強度

Ar ガスセル天井壁遮蔽厚評価時の線量率分布解析結果から、ダクト入口の線源強度は、炉停止 7 日後で次のようになる。*

| | |
|---------|---------------------------|
| 直接ガンマ線 | 2.0×10^7 mrem/hr |
| 中性子 | 5.9×10^4 " |
| 2 次ガンマ線 | 1.9×10^3 " |
| 計 | 2.0×10^7 mrem/hr |

これより、中性子は線源として無視できることがわかる。

(iv) 追加屈曲線

(1), (2)式において $\phi_0 = 2 \times 10^7$ mrem/hr とすると、炉停止 7 日後の使用済燃料貯蔵に必要な追加屈曲数は、追加ダクト長を 5 m とすると、排気ダクトで 1 屈曲、吸気ダクトで 2 屈曲となる。

追加 1 屈曲分を減らし目標線量率を満たすためには、各 5 m のダクトの長さは次のように延長が必要である。

| | 設計線量率 | ダクト長 |
|-------|---------------|-------|
| 排気ダクト | 0.625 mrem/hr | 14 m |
| 吸気ダクト | 0.625 " | 9.5 m |
| | 1.0 " | 8 m |

また、線源強度の減衰により、追加屈曲数が 1 屈曲分減るには、概略次のような時間減衰後と見積られる。

| | 設計線量率 | 減衰期間 |
|-------|---------------|------|
| 排気ダクト | 0.625 mrem/hr | 9 ヶ月 |
| 吸気ダクト | 0.625 " | 4 ヶ月 |
| | 1.0 " | 2 ヶ月 |

吸気ダクトは 2 年経過後においても追加屈曲線は最低 1 回必要である。

(v) 結果

貯蔵設備の遮蔽構成を解析評価し、各種設計条件のもとでの必要遮蔽壁厚を明らかにした。

普通コンクリート遮蔽においては、側壁必要厚は 214 ~ 237 cm となった。また天井壁必要厚は 151 ~ 161 cm となった。重コンクリート遮蔽とすると、これに対し 3 割前後の壁厚削減がもたらされる。

また、保持筒内貯蔵方式において、貯蔵設備遮蔽壁を貫通する吸排気ダクトのストリーミング遮蔽に必要なダクト屈曲数を明らかにした。

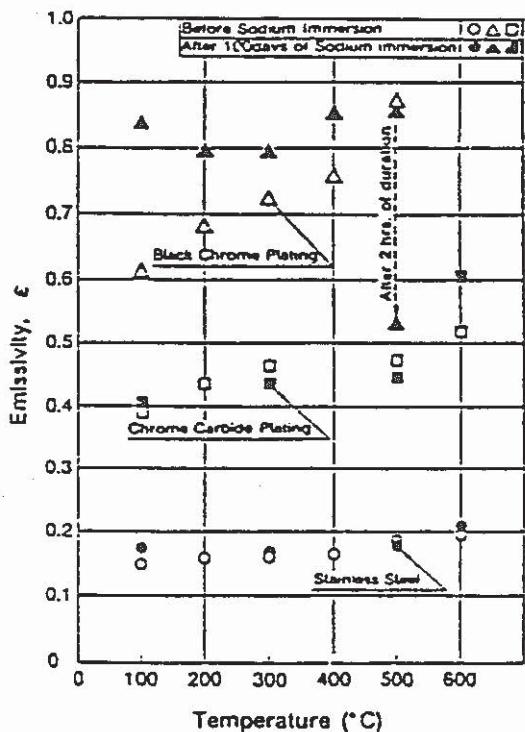
* 炉停止 7 日後相当の線源強度を有する使用済燃料集合体が、収納可能な最大本数 (169 本) 存在するとした。

付一 13 ブラッククロム被ふくスランレス材表面のふく射率

ブラッククロム被ふくステンレス材表面のふく射率に関しては、原子力学会「昭和59年秋の分科会」予稿集所収の“ナトリウム浸漬材の熱放射率”より

- ナトリウム未浸漬材では $\epsilon = 0.8$ (表面温度 100 °C ~ 500 °C)
- ナトリウム浸漬材 表面温度 400 °C 以下 $\epsilon = 0.8$
表面温度 400 °C 以上 $\epsilon = 0.5$
(300 °C, 100 日間浸漬)

なるデータがあり、現状の知見で採用し得るポット表面のふく射率は 0.5 程度と推定される。保持筒内面についてはナトリウム中への浸漬は無いが、不確定性を考慮して 0.5 を代表値とする。



ナトリウム浸漬前後の熱放射率

(出典)

原子力学会「昭和58年秋の分科会」
予稿集
論文タイトル “ナトリウム浸漬材の
熱放射率”

付一 14 ポット内ナトリウム溶融発熱量

保持筒内貯蔵方式—空気自然通風冷却において、冷却中にナトリウムが凍結し始めるときの使用済燃料の崩壊熱量を以下の様に求める。

ナトリウムの融点は約98°Cより、ポットの壁温が100°Cのときナトリウムが凍結すると仮定し、
ポット壁温 = 100°C一定、保持筒内壁温をパラメータとしてポット—保持筒間の伝熱量を求める。
(ポット壁の熱伝導は考慮せず、外壁温を100°C一定としている)

また、保持筒—空気間では、保持筒内壁温をパラメーターとして、伝熱量を求める。

定常時では、ポット—保持筒間、保持筒—空気間の両者の伝熱量が等しくなる。このときの伝熱量が、ナトリウムが凍結し始めるときの崩壊熱量となる。

① ポット—保持筒間伝熱量

ポット—保持筒間の伝熱には、輻射熱とポットと保持筒間にアルゴンガスの熱伝導による伝熱がある。

ポット外径 D₁ (m)、保持筒内径 D₂ (m) 及び放熱有効高さ H (m) を用いると、輻射熱 Q₁ (kcal/h) は次のようになる。

$$Q_1 = \left\{ \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D_1}{D_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)} \right\} \cdot \pi D_1 H \cdot \delta (T_1^4 - T_2^4)$$

ここで、 ε : 輻射率

δ : ステファン・ボルツマン定数 = 4.88×10^{-8} (kcal/m² h K⁴)

T₁ : ポット外壁温度 (K)

T₂ : 保持筒内壁温度 (K)

一方、ポットと保持筒間にアルゴンガスの熱伝導による伝熱量 Q₂ (kcal/h) は

$$Q_2 = \frac{2\pi\lambda H}{\ln(\frac{D_2}{D_1})} (T_1 - T_2)$$

ここで、 λ : アルゴンガス熱伝導率 (kcal/m h K)

$$\lambda = 1.854 \times 10^{-2} + 4.837 \times 10^{-5} t - 1.284 \times 10^{-8} t^2$$

$$t = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

ポットと保持筒のギャップは非常に狭くアルゴンガスの対流熱伝達による伝熱は十分に小さく無視できるものとする。

ポットから保持筒へ移行するトータルの熱量、Qは、

$$Q = Q_1 + Q_2$$

となる。

$T_1 = 100^{\circ}\text{C}$ 一定, $D_1 = 0.267 \text{ m}$, $D_2 = 0.286 \text{ m}$, $\epsilon = 0.5$ として, $T_2 = 10\sim 95^{\circ}\text{C}$ の伝熱量の結果を図付14-1に示す。(単位はwattで表わす。)

② 保持筒-空気間伝熱量

自然対流の熱伝達は、垂直面の式(Ref. 伝燃工学資料 1975)を用いる。

○層流

一様伝熱面温度および一様周囲流体温度の場合に熱流束分布は次式で算出される。

$$N_{ux} = K (\nu_\infty / \nu_w)^{0.21} (G_{rx} P_r)^{1/4}, G_{rx} P_r \lesssim 10^3 \sim 3 \times 10^{10} \quad (1)$$

$$\text{ここに, } N_{ux} = \alpha_x x / \lambda_\infty \quad (2)$$

$$\alpha_x = q_x / (T_w - T_\infty) \quad (3)$$

$$G_{ru} = x^2 \beta (T_w - T_\infty) / \nu_\infty^2 \quad (4)$$

$$K = (3/4) \{ 2P_{r\infty}/5 (1 + 2P_{r\infty}^{-1/2} + 2P_{r\infty}) \}^{1/4} \quad (5)$$

ただし、空気については粘性に関する補正係数を $\nu_\infty / \nu_w = 1$ とする。

0から ℓ までの面積平均熱伝達係数 α_m およびそれに対応する平均スセルト数 N_{um}

$$N_{um} = \alpha_m \ell / \lambda_\infty \quad (6)$$

は(1)式の $x = \ell$ における局所値を $4/3$ 倍する。

T_w : 保持筒壁温 ($^{\circ}\text{C}$)

T_∞ : 空気雰囲気温度 ($^{\circ}\text{C}$)

x : 保持筒下端からの距離 (m)

添字

x : x における局所値

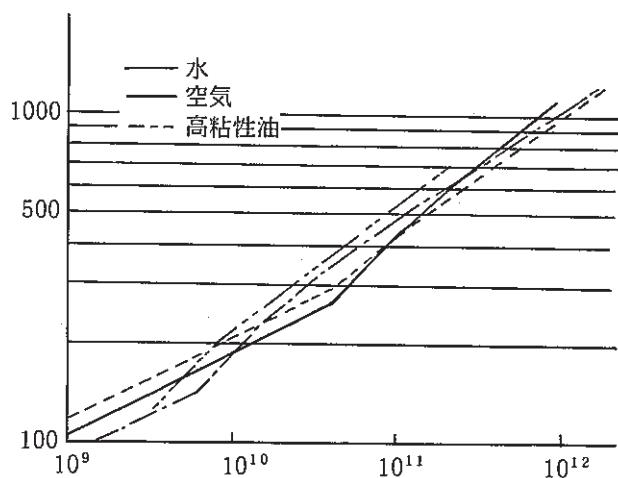
m : 0~ x までの面積平均値

w : T_w における物性値

∞ : T_∞ " "

ここでは平均値、 N_{um} を計算する($x = 4.3 \text{ m}$)

◦乱 流

下図により平均値, N_{um} を求める。

◦物性値

圧力: 1 kg/cm² (飽和水蒸気を除き)

| 物質 | 温度 °C | 比重 γ kg/m ³ | 比熱 C_p kcal/kg°C | 粘性係数 η kg/m ² | 動粘性係数 ν m ² /s | 熱伝導率 λ kcal/m h°C | 温度伝導率 α m ² /h | プラントル 数 P_r |
|----|----------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--|---------------------|
| 空気 | -100 | 1.984 | 0.241 | $\times 10^{-6}$ 1.21 | $\times 10^{-7}$ 0.060 | 0.013 5 | 0.028 1 | 0.77 |
| | -50 | 1.533 | 0.240 | 1.49 | 0.095 | 0.017 2 | 0.046 8 | 0.73 |
| | -20 | 1.348 | 0.240 | 1.65 | 0.120 | 0.019 3 | 0.059 7 | 0.73 |
| | 0 | 1.251 | 0.240 | 1.76 | 0.133 | 0.020 7 | 0.063 9 | 0.72 |
| | 20 | 1.165 | 0.240 | 1.86 | 0.155 | 0.022 1 | 0.078 9 | 0.71 |
| | 40 | 1.091 | 0.241 | 1.95 | 0.175 | 0.023 4 | 0.089 2 | 0.71 |
| | 60 | 1.026 | 0.241 | 2.05 | 0.195 | 0.024 7 | 0.100 | 0.71 |
| | 80 | 0.968 | 0.241 | 2.14 | 0.217 | 0.025 0 | 0.111 | 0.70 |
| | 100 | 0.915 | 0.242 | 2.23 | 0.239 | 0.027 2 | 0.123 | 0.70 |
| | 120 | 0.869 | 0.242 | 2.32 | 0.252 | 0.028 5 | 0.135 | 0.70 |
| | 140 | 0.827 | 0.243 | 2.40 | 0.285 | 0.029 7 | 0.148 | 0.69 |
| | 160 | 0.79 | 0.243 | 2.48 | 0.308 | 0.030 9 | 0.161 | 0.69 |
| | 180 | 0.754 | 0.244 | 2.56 | 0.333 | 0.032 0 | 0.174 | 0.69 |
| | 200 | 0.722 | 0.245 | 2.64 | 0.358 | 0.033 2 | 0.188 | 0.69 |
| | 250 | 0.552 | 0.247 | 2.83 | 0.425 | 0.035 9 | 0.223 | 0.69 |
| | 300 | 0.596 | 0.250 | 3.01 | 0.495 | 0.038 6 | 0.259 | 0.69 |
| | 350 | 0.548 | 0.253 | 3.18 | 0.569 | 0.041 2 | 0.298 | 0.69 |
| | 400 | 0.503 | 0.255 | 3.34 | 0.645 | 0.043 7 | 0.337 | 0.69 |
| | 500 | 0.442 | 0.261 | 3.65 | 0.810 | 0.048 3 | 0.419 | 0.70 |
| | 600 | 0.391 | 0.267 | 3.94 | 0.989 | 0.052 7 | 0.506 | 0.70 |
| | 800 | 0.319 | 0.276 | 4.47 | 1.37 | 0.061 0 | 0.693 | 0.71 |
| | 1,000 | 0.255 | 0.285 | 4.94 | 1.83 | 0.069 0 | 0.913 | 0.72 |
| | 1,200 | 0.232 | 0.293 | 5.38 | 2.28 | 0.076 6 | 1.13 | 0.73 |
| | 1,400 | 0.204 | 0.302 | 5.79 | 2.78 | 0.083 4 | 1.35 | 0.74 |
| | 1,600 | 0.183 | 0.312 | 6.17 | 3.31 | 0.090 | 1.53 | 0.75 |

以上の熱伝達の式及び図より、保持筒から空気への伝熱量、 Q (kcal/h) を求める。

$$Q = \alpha \pi d \cdot H (t_w - t_\infty)$$

ここで、 α : 热伝達率 (kcal/m² h °C)

d : 保持筒内径 (m) = D_2

H : 放熱有効高さ (m)

t_w : 保持筒壁温 (°C)

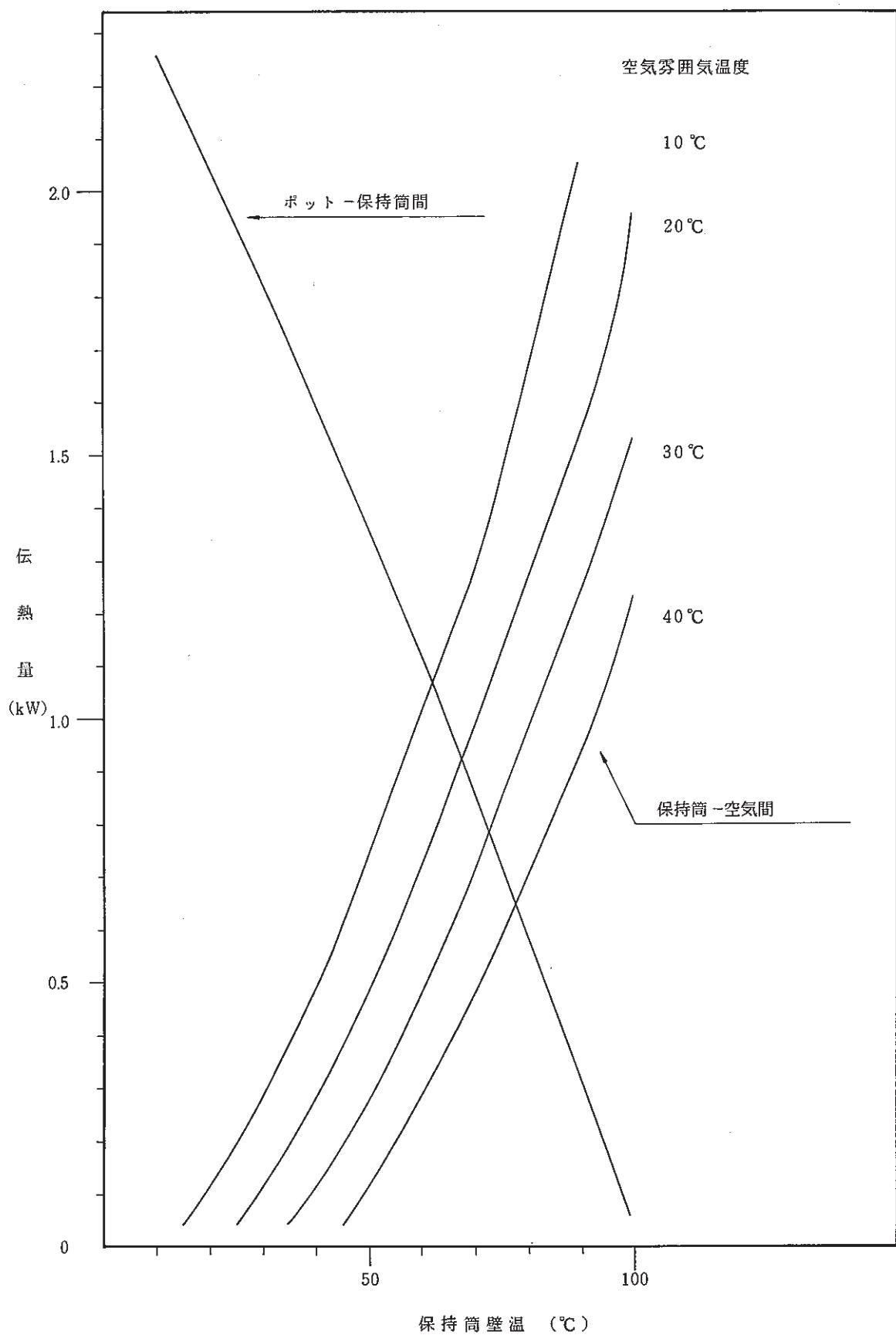
t_∞ : 空気雰囲気温度 (°C)

但し、保持筒壁の熱伝導は無視できるものとし、保持筒内壁温=保持筒外壁温とする。

空気雰囲気温度=10~40°Cについて、保持筒壁温=15~100°Cにおける熱量結果を図付14-1に示す(単位はwattで表わす)。結果から、すべて乱流であった。

<結果>

図付14-1より、ポット-保持筒間の伝熱量と保持筒-空気間の伝熱量が交差する熱量が定常時であり、ナトリウムの凍結が予想される崩壊熱量である。表付14-1に結果をまとめる。



図付 14-1 伝熱量結果

表付14-1 ナトリウム凍結が生じる崩壊熱量

| 空気雰囲気温度 (°C) | 保持筒壁温 (°C) | 熱量 (kW) |
|-----------------|---------------|------------|
| 10 | 63.0 | 1.07 |
| 20 | 67.5 | 0.93 |
| 30 | 73.0 | 0.78 |
| 40 | 78.0 | 0.65 |