

使用済み燃料横型サイロ貯蔵施設の基本設計

南了悟* 中田哲夫* 高橋伸行**

横型サイロ貯蔵施設は、米国で実用化された軽水炉の使用済み燃料乾式貯蔵システムであり、我が国の使用済み燃料中間貯蔵施設の候補概念の一つであることから、経済性向上、日本の安全審査指針・技術基準、貯蔵燃料の仕様、耐震条件等との適合性を考慮して、我が国向けの横型サイロ貯蔵施設の開発を進めてきた。

横型サイロ貯蔵施設の設計に当たっては、日本の条件に適合させるため、除熱性向上、遮へい性能向上、耐震性向上および貯蔵密度向上の改良を行った。また、キャニスター内伝熱流動実験を実施し、キャニスター内のヘリウムの自然対流が使用済み燃料の除熱に寄与し、また、キャニスター内圧を高めることで効果が促進されることを確認した。この結果より、キャニスターにはヘリウムを充填し、加圧することとし、設計に反映した。

米国での実績に加え、本研究の成果により横型サイロ貯蔵方式の使用済み燃料貯蔵施設の日本での適合性を確認できた。

Keywords: 軽水炉、使用済み燃料、使用済み燃料中間貯蔵、使用済み燃料貯蔵施設、横型サイロ貯蔵方式、キャニスター、コンクリートサイロ、伝熱流動

The Horizontal Modular Storage System is the dry storage system for the spent nuclear fuel, which was developed in the USA. It is one of the candidacy concepts for the interim spent fuel storage facility installed at away from reactor in Japan. We performed the conceptual design to reduce cost and to meet Japanese safety guidelines, rules and standards, fuel specifications and seismic conditions.

To meet Japanese conditions, the heat removal characteristic, the shielding characteristic, the aseismic characteristic and the required space are improved.

We also performed the experiments of the thermal hydraulics in the canister to confirm the heat removal characteristic of the system. The results show that the natural convection of the helium in the canister is effective to remove the residual heat from the spent fuel and the effect is improved when the helium is pressurized.

The storage experience in the USA and the results of this study show, the Horizontal Modular Storage System is acceptable for the interim spent fuel storage facility installed in Japan..

Keywords: LWR, spent nuclear fuel, interim storage, spent fuel storage facility, horizontal modular storage system, canister, concrete module, thermal hydraulics

1 はじめに

我が国では発電所外の使用済み燃料中間貯蔵施設を2010年までに利用できるようにすることが必要であるとし、国および電力会社を中心に、中間貯蔵施設の実現に向けた準備が進められている。

米国で開発された軽水炉の使用済み燃料乾式貯蔵システムであり、NUHOMS システム[1]として知られている横型サイロ貯蔵施設は、1989年に H.B.Robinson 原子力発電所に採用されて以来、2002年末時点で米国内 13ヶ所の原子力発電所内の使用済み燃料貯蔵施設(ISFSI)に採用され、そのうち 8ヶ所の発電所では既に貯蔵が行われている。Fig.1 はそのうちの一つである Rancho Seco 発電所(カリフォルニア州)に設置された横型サイロ貯蔵施設(NUHOMS-24P)である。

本報告では、日本の安全審査指針・技術基準、貯蔵燃料の仕様、耐震条件等との適合性を考慮して設計した横型サイロ貯蔵施設の概要およびキャニスター内伝熱流動実験の概要について紹介する。

Conceptual design of the horizontal modular storage system for spent nuclear fuel by Ryogo Minami (minami@nupec.or.jp), Tetsuo Nakata, Nobuyuki Takahashi

*川崎重工業株式会社 パワープラント事業部 開発部
Research & Development Department Power Plant Division Plant & Infrastructure Engineering Company Kawasaki Heavy Industries, LTD
〒136-8588 東京都江東区南砂 2-11-1

**川崎重工業株式会社 関東技術研究所 先進材料研究部
〒136-8588 東京都江東区南砂 2-6-5
Kanto Technical Institute, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

2 横型サイロ貯蔵施設の概要

2.1 設備の構成

横型サイロ貯蔵施設は、使用済み燃料をステンレス鋼製のキャニスターに収納し、鉄筋コンクリート製のコンクリートサイロ内に水平に貯蔵するコンクリートモジュール方式の使用済み燃料乾式貯蔵システムである。コンクリートサイロ 1 基とキャニスター 1 基からなるモジュールを複数基並べて設置することにより貯蔵施設が構成される。



Fig.1 NUHOMS-24P Spent Fuel Horizontal Storage System at Rancho Seco Nuclear Power Station

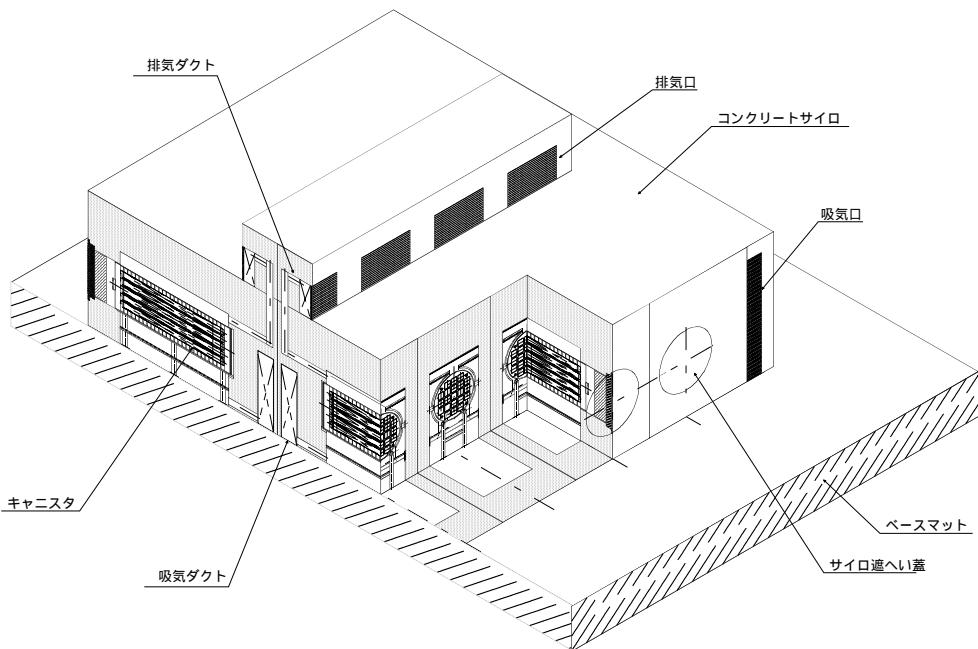


Fig.2 Concept of the Horizontal Storage System for Japanese Storage Facilities

Table 1 Specifications of the horizontal storage system for Japanese storage facilities

項目		PWR	BWR
燃料		冷却年数 5 ~ 10 年	
発熱率		約 1 kW/体	約 0.4 kW/体
キャニスター		型式 両端遮へい付き円筒密封容器	
キャニスター	使用済燃料	24 体	52 体
	収納体数		
キャニスター	直径 × 全長	約 1.7 × 4.7m	約 1.7 × 5.0mm
	バスケット形式	スペーサディスク型	
サイロ	キャニスター材質	ステンレス鋼	
	固定中性子吸收体	BORAL 等	B-SUS 等
サイロ		型式 遮蔽扉付ペースマット一体型 コンクリートサイロ	
キャニスター貯蔵体数		1 体/サイロ	
冷却方式		自然通風冷却	
幅 × 高さ × 奥行		約 3 × 7 × 7m	

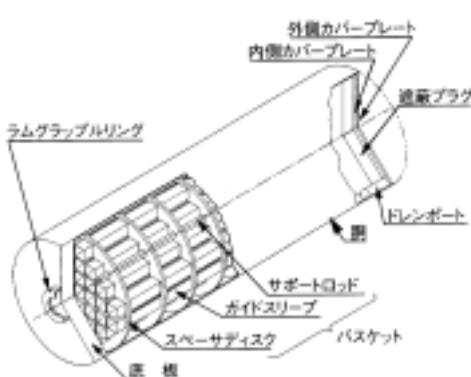


Fig.3 Concept of Canister

日本の安全審査指針・技術基準、貯蔵燃料仕様、耐震条件等との適合性を考慮して設計した横型サイロ貯蔵施設の概念例を Fig.2 に、その概略仕様を Table 1 に示す。

キャニスターは直径約 1.7m、長さ約 5m のステンレス鋼製円筒容器で、燃料プールで 5~10 年冷却した使用済み燃料を 1 基当たり PWR 燃料 24 体まで、または BWR 燃料 52 体まで貯蔵が可能である。キャニスターの概念例を Fig.3 に示す。内部にスペーサディスク、サポートロッドおよびガイドスリーブで構成されたバスケットを有しており、ガイドスリーブ中に使用済み燃料を貯蔵する。キャニスターの蓋は二重とし、溶接で本体に取り付け、密封される。内部は燃料被覆管を保護するため、ヘリウムが充填される。

2.2 横型サイロ貯蔵施設の特徴

横型サイロ貯蔵施設は使用済み燃料を安全な状態に維持し、周辺公衆への影響を最小とするよう設計されている。横型サイロ貯蔵施設の特徴を Table 2 に、安全設計の考え方を Table 3 に示す。

本施設は、コンクリートサイロ内を自然通風で流動する空気で使用済み燃料を冷却し、燃料被覆管温度を制限温度以下に維持する受動的な冷却システムを有しており、送風機のような動的な機器がないため、メンテナンスがほとんど不要で、貯蔵中は放射性廃棄物の発生もなく、運転維持費が小さい。また、コンクリートサイロ自体で遮へいを構成しているため、少ない資本費で建設することができる。

貯蔵施設はモジュール化されており、モジュールの数は、貯蔵容量に合わせて自由に選定可能である。このため、小規模の発電所内貯蔵設備から、大規模の敷

地外中間貯蔵設備まで適用できる。また数基ずつ段階的に増設していくことが可能で、建設工期が短いことから、使用済み燃料の発生にあわせ、必要な時期に必要な基数だけ逐次増設していくことができるフレキシビリティーのある貯蔵システムである。

Table 2 Characteristics of the Horizontal Storage System

◆ モジュール方式	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵容量のフレキシビリティ 貯蔵必要量に合わせ、基数を自由に設定可能 増設が容易 貯蔵需要に合わせ、段階的に増設可能 建設工期が短い
◆ 使用済み燃料の自然通風冷却	<ul style="list-style-type: none"> 故障要因が少ない 非常用電源不要 運転維持費が少ない 動的な機器がなく、保守点検が容易
◆ 遮へい機能の分担によるコスト低減	<ul style="list-style-type: none"> 輸送時：鋼製キャニスタ輸送キャスクを繰り返し使用可能 貯蔵時：安価なコンクリート
◆ キャニスタの溶接による密封	<ul style="list-style-type: none"> 法兰ジ構造に比べ、構造簡素 一般に、高い密封性の確保可能
◆ 既設設備の活用(原子炉建屋内で燃料装荷)	<ul style="list-style-type: none"> 燃料装荷 : 使用済み燃料貯蔵プール 使用済み燃料取扱 : 燃料交換機 キャスク取扱 : 原子炉建屋天井クレーン
◆ 水平輸送、水平貯蔵	<ul style="list-style-type: none"> キャニスタ取扱高さが低い
◆ 放射性廃棄物の発生量少	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵中、貯蔵施設からの放射性廃棄物発生なし
◆ 廃止措置が容易	<ul style="list-style-type: none"> モジュール方式であり、解体・撤去が容易 貯蔵中、コンクリートの汚染がない

2.3 燃料装荷手順

横型サイロ貯蔵施設の燃料装荷手順を Fig.4 に示す。キャニスタへの燃料装荷は、一般的な使用済み燃料輸送キャスクへの装荷と同様に、原子力発電所の使用済燃料プール中で既存の燃料取扱機器を用いて行われる。使用済み燃料を装荷したキャニスタは、プールより取り出したのち、燃料取扱建屋にて蓋を溶接し、密封される。さらに、内部の水の排出、真空乾燥およびヘリウム充填をおこなった後、移送台車にて貯蔵施設まで運搬し、コンクリートサイロ内に貯蔵される。キャニスタ自体は遮へい機能を持たないため、使用済み燃料プールから貯蔵施設まで運搬する間は、遮へいを構成する金属製のキャスクに収納して取り扱われる。

2.4 日本の安全指針・技術基準との適合性

横型サイロ貯蔵施設の設計に当たっては安全審査指針・技術基準、貯蔵燃料の仕様、耐震条件等の設計条件などの日米の相違により、横型サイロを日本国内へ導入した場合の成立性の確認が必要であるため日本の基準への適合性を評価し、安全性を確認した。日本の基準に適合させるために加えた設計の主な改良点を以下に示す。

(1) 除熱性向上 :

日本では、米国に比べ燃料被覆管の許容温度が厳しい。(米国の横型サイロ貯蔵施設の例では PWR 384, BWR 421 であるのに対し、国内の金属キャスクの例では PWR 370, BWR 390、また米国では移送時等の短期間の事象に対しては 570 を適用) また、発熱の大きい燃料の貯蔵が想定される。このため本設計では天井部に高さ約 2m のスタッフを設け、外気とコンクリートサイロ内の空気の温度差によって生じる

Table 3 Safety Features of the Horizontal Storage System

安全機能	評価基準	設計の考え方
除熱	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵中および構内移送時に燃料被覆管最高温度が許容温度以下であること コンクリート等、安全機能を有する構成部材が想定される異常事象に対しても許容温度以下であること 	1) 貯蔵中 キャニスタ内：放射、伝導、ヘリウムの対流 コンクリートサイロ内：自然通風冷却 吸排気温度監視 2) 構内移送/事業所外運搬時 キャニスタ内：放射、伝導、ヘリウムの対流 キャスク外面：自然対流
密封	<ul style="list-style-type: none"> 貯蔵中および構内移送時の異常事象に対してもキャニスタの発生応力が許容応力以下であること 	1) 燃料被覆管およびキャニスタによる 2 重密封 2) キャニスタ 2 重蓋のシール溶接 3) 漏洩監視不要(溶接の健全性で担保)
遮へい	<ul style="list-style-type: none"> コンクリートサイロ、キャスク表面および貯蔵施設敷地境界線量当量率が許容線量当量率以下であること 	1) 貯蔵時 サイロ・コンクリート壁および遮へい蓋 吸排気口屈曲によるストリーミング抑制 貯蔵区域空間線量当量率連続監視 2) 構内移送時 キャスク構造部材および 線、中性子遮へい体
臨界防止	<ul style="list-style-type: none"> 想定される異常事象を考慮しても中性子実効増倍率 (k_{eff}) が 0.95 以下であること 	1) バスケットにより貯蔵体系維持 2) 必要に応じ中性子吸収材(BORAL,B-SUS等)

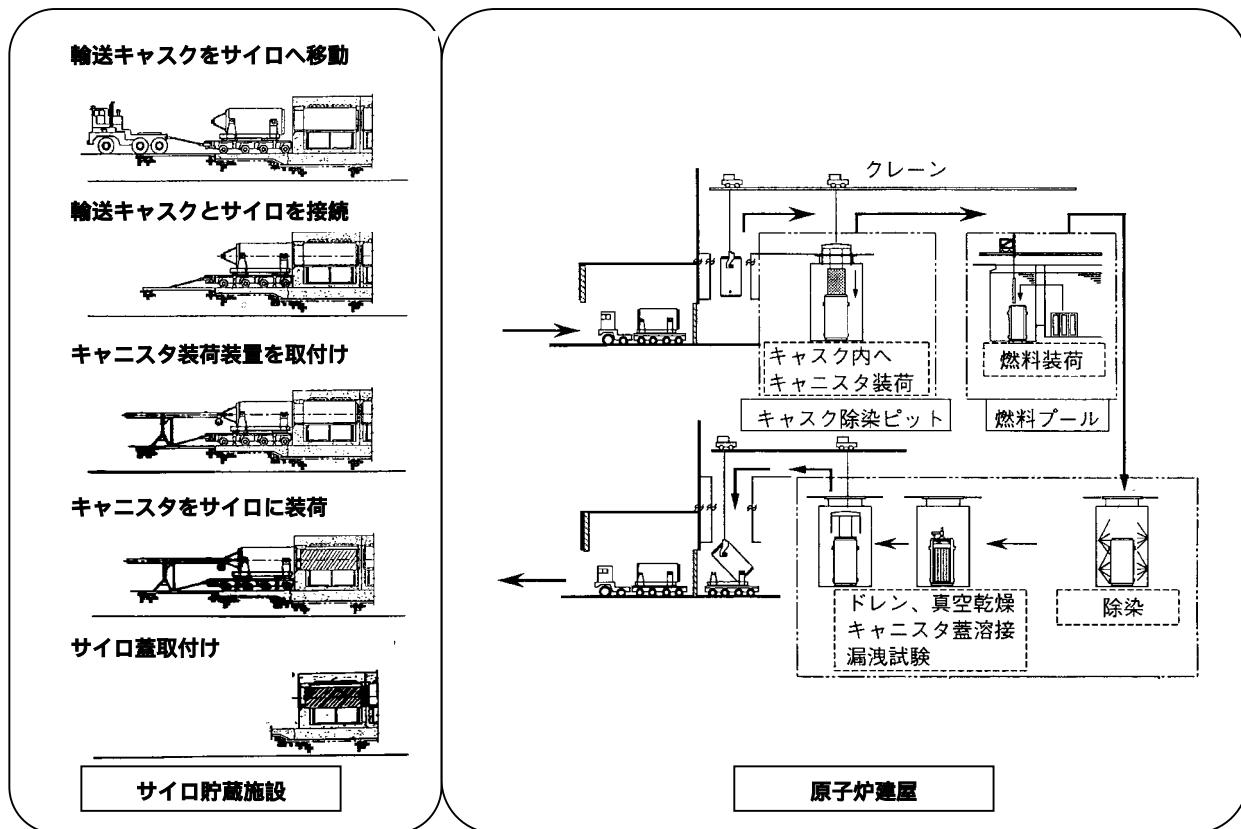


Fig.4 Handling Flow of the Horizontal Storage System

ドラフト力を十分とることで自然通風冷却空気流量を確保し、発熱の大きい燃料の貯蔵を可能とした。

(2) 遮へい性能向上：

コンクリートサイロの表面線量当量率は米国では輸送キャスク (2mSv/h 以下) なみとしているが、作業従事者および周辺公衆の被ばくをできる限り小さくするため、コンクリートサイロの壁厚を 1.5m とし、表面線量当量率が非管理区域なみ ($6\mu\text{Sv/h}$ 以下) となるよう設計した。また、吸排気ダクトを屈曲構造とし、吸排気口近傍のストリーミング線量も非管理区域なみとなるよう設計した。

以上の改良により本設計では貯蔵建屋等の補助遮へいなしで敷地境界の線量率を基準値以下にすることが可能である。

(3) 耐震性向上：

米国の一般的な条件では考慮すべき地震力は水平方向 $0.25G$ 、鉛直方向 $0.17G$ であるが、日本国内ではより大きな地震力が想定されるため、コンクリートサイロの壁厚を十分厚くするとともに、本体の高さは 4.8m と、できる限り高さを低くした。なお、米国ではプレハブ式のコンクリートサイロが開発されているが、本設計では基礎と一体で建設する構造とし、十分な耐震性を持たせた。

(4) 貯蔵密度向上：

国内の立地点の敷地面積が限られると予想されるた

め、多段式のキャニスター装荷装置の採用等により、コンパクトな配置を実現した。

3 キャニスター内伝熱流動試験

横型サイロ貯蔵施設の除熱性能を把握するため、Table 4 に示す一連のキャニスター内伝熱流動試験 [2-7] を実施した。得られた結果の概要は以下の通りである。

(1) 基礎特性試験では、ヒータの発熱量を 45kW に維持し、キャニスター内圧を真空 ($1.3 \times 10^{-3}\text{Pa}$)、低圧 (670Pa)、中圧 (0.14MPa) および高圧 (0.45MPa) として、キャニスター各部の温度を計測した。Fig.5 に示すように、キャニスター内のヘリウムガス圧力が高くなるに従い、キャニスター中心部の温度分布が上下非対称となる。

Table 4 Experiments of the thermal hydraulics in the canister

項目	基礎特性試験	可視化試験	実機模擬試験
目的	放射、伝導、対流の基本特性把握および解析モデル検証	自然対流現象の可視化技術による特性把握および解析モデルへの反映	実機模擬条件下での解析モデル検証
流体	真空、ヘリウム(低/高圧)	空気、水	真空、混合ガス
セル	1/4	1/5	1/4
対象	PWR 24 体	PWR 24 体	PWR 24 体

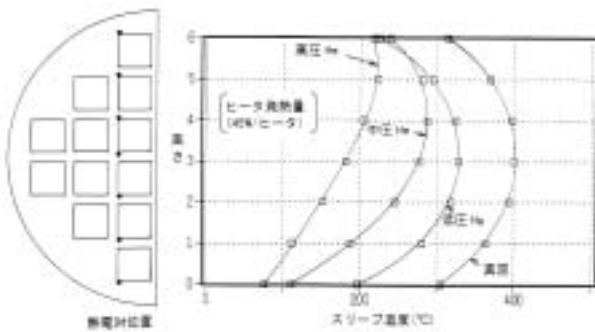


Fig.5 Temperature Distribution at the Center Line of the Canister at Various Helium Pressures

ともに、最高温度が大きく低下し、除熱が促進されていることが確認できた。これは、高圧になるに従いキャニスタ内の自然対流が大きくなり、自然対流による熱輸送量が増大しているためと考えられる。

(2)可視化試験では、キャニスタ内自然対流の流速分布を定量的に計測した。キャニスタ内の流体は空気または水とし、流体が空気の場合はステアリン酸亜鉛で、水の場合はポリスチレン粒子で流れを可視化し、Fig.6に示すような流況を得た。また、Fig.7に解析で求めた流速および温度分布を示す。解析で求めた全体の流況は試験結果とよく一致している。

(3)実機模擬試験では、レーリー数(Ra) $2 \times 10^6 \sim 1.4 \times 10^8$ の範囲でキャニスタ内の温度分布を計測した。Fig.8に示すように、キャニスタ内圧 P が増加するにしたがって、温度差 ΔT (中央垂直ギャップに面するガイドスリープ表面平均温度とキャニスタ内面の平均温度の差) は指数関数的に減少し、両者は、

$$T \propto P^{-0.3}$$

という関係でほぼ整理でき、ガス圧力をある程度加圧した場合は、自然対流による除熱効果が促進され、燃料被覆管温度の低減に有効であることが確認できた。

(4)可視化試験および実機模擬試験結果よりキャニスタ内の伝熱相關式を求めた。レーリー数(Ra)を $3 \times 10^6 \sim 2 \times 10^8$ の範囲で変化させた試験結果より、Fig.9に示すように、

$$Nu = 0.07 \sim 0.1 Ra^{1/4}$$

という結果が得られた。

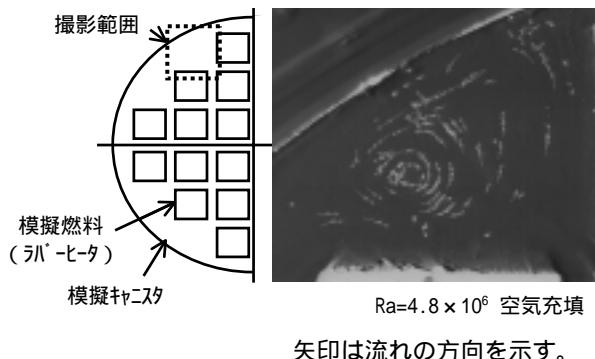


Fig.6 Flow Pattern in the Canister.(Visualization Test)

以上より、キャニスタ内のヘリウムの自然対流が使用済燃料の除熱に寄与し、また、キャニスタ内圧を高めることで、除熱効果が促進されることを確認した。この結果より、キャニスタにはヘリウムを充填し、加圧することとし、設計に反映した。

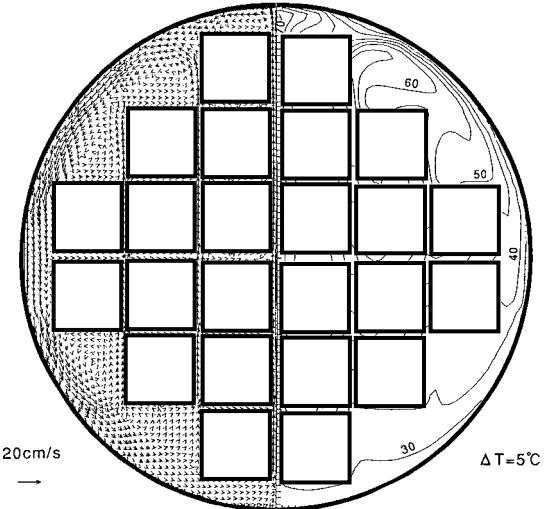


Fig.7 Computation results of flow and temperature field ($Ra=9.3 \times 10^6$ Fluid: Air)

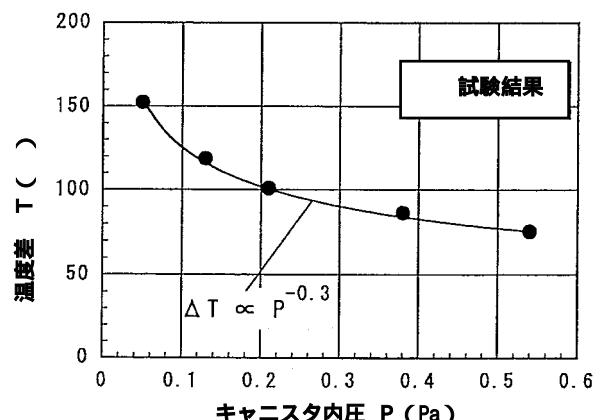


Fig.8 Relation between pressure and ΔT in the canister

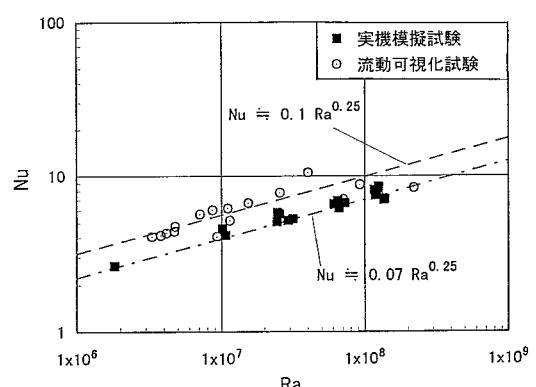


Fig.9 Heat Transfer Characteristics in the Canister

4 おわりに

使用済燃料貯蔵施設として経済性が優れ、かつ高い安全性を有するシステムの一つである横型サイロ貯蔵施設の概念検討、安全評価を実施し、日本へ導入した場合の安全性を確認するとともに、キャニスター内伝熱流動実験を実施し、使用済み燃料の除熱特性を把握し、その成果を設計に反映した。

米国での実績に加え、本研究の成果により横型サイロ貯蔵方式の使用済燃料貯蔵施設の日本での適合性を確認できた。

参考文献

- [1] VECTRA Technologies, Inc.: Safety Analysis Report for the Standardized NUHOMS® Horizontal Modular Storage System for Irradiated Nuclear Fuel, Revision 4A, (1996)
- [2] Minami,R. et al.: A design Study of Horizontal Dry Storage System in Japan, *The 1993 International Conference on Nuclear Waste Management and Environmental Remediation, Prague, September 5-11, 1993, Czrch Republic*, pp.631-638 (1993)
- [3] 高橋伸行 他：横型コンクリートサイロ貯蔵施設の研究・第1報（ふく射伝熱を伴なう密閉容器内自然対流試験），第30回日本伝熱シンポジウム，横浜，平成5年5月27日，pp.559-561，(1993)
- [4] 西村元彦 他：横型コンクリートサイロ貯蔵施設の研究・第2報（放射伝熱を伴なう密閉容器内自然対流の解析），機械学会第71期大会，広島，平成5年10月2日，pp.16-18，(1993)
- [5] 西村元彦 他：横型コンクリートサイロ貯蔵施設の研究・第3報（放射伝熱を伴なう密閉容器内自然対流の相似則に関する検討），機械学会関西支部 第69回講演会論文集, pp.181-183 , (1994)
- [6] Shibasaki,H., et al.: Study on Natural Convection Heat Transfer in the Horizontal Dry Storage System for LWR Spent Fuel Assemblies, *The 3rd International Conference on Nuclear Engineering, Kyoto, Japan, April 25, 1995*, pp.95-100, (1995)
- [7] 南了悟 他：使用済燃料横型サイロ貯蔵方式の除熱性能評価，火力原子力発電，48-8，pp.48-56，(1997)