

水平流ボールド貯蔵システムの概念と除熱・遮へい評価

熊谷直己¹ 西高志¹ 清水仁² 森本裕一³ 小田将史¹

金属キャスクに代わる低コスト、高密度貯蔵が可能な貯蔵方式として、水平流方式ボールド貯蔵システムの開発を進めている。キャニスタを2段積みし、より高密度化した貯蔵施設の概念を考案し、除熱性能評価および熱流動解析手法の検証のため、1/5 スケールの除熱試験を実施した結果、2次元モデルを用いた熱流動解析手法が有効であることを示した。さらに、高燃焼度燃料を対象とした貯蔵施設の試設計を行い、除熱性能および遮へい性能をそれぞれ評価した結果、共に必要な性能を有することを確認した。

Keywords: 使用済み燃料, 中間貯蔵, ボールド, 水平流, 除熱, 遮へい

The cross flow type vault storage system has been developed to realize a higher storage density than the conventional system. In this system, two canisters can be stored vertically in a storage tube. In order to evaluate heat removal performance of the vault system, 2D thermal fluid dynamics calculations were carried out, and it was verified by the 1/5-scale mockup tests. Further, a full-scale storage facility was designed for high burnup spent fuels, and it was confirmed that the performance of heat removal and radiation shielding were satisfactory for the requirements.

Keywords: spent fuels, intermediary storage, vault, cross flow, heat removal, radiation shielding

1 はじめに

原子力発電所より発生する使用済み燃料は、再処理によって再び燃料として利用される資源である。しかし近年、各発電所内の燃料貯蔵プールは容量が不足し始めており、発電所外への中間貯蔵施設の建設が検討されている。この中間貯蔵施設には、当面金属キャスク方式が採用される見込みであるが、青森県六ヶ所村に現在建設中の再処理工場が稼働した場合においても、使用済み燃料の発生量は処理量を上回り、今後長期にわたって使用済み燃料の貯蔵量が増大していく見通しである。このため将来は、遮へい体に金属ではなくコンクリートを用いて低コスト化を図ったコンクリートモジュール方式が、金属キャスクに代わる貯蔵方式として期待されている。

コンクリートモジュール方式には、コンクリートキャスク方式、サイロ方式およびボールド方式がある。このうち、コンクリートキャスク方式とサイロ方式は燃料の密封容器ごとに遮へい体を設けるのに対して、ボールド方式は多数の密封容器を一括して建屋で遮へいするため、高密度に貯蔵を行うことが可能である。そこで、将来の第2、第3の大規模中間貯蔵施設を睨んで、低コストと高密度貯蔵を同時に実現可能であると考えられるボールド方式に着目し、貯蔵室構造がシンプルな水平流方式の採用と燃料容器の2段積み構造で、さらにコスト低減と貯蔵密度増加を図った使用済み燃料貯蔵システムの概念を考案し、実用化を目指した技術開発を進めて

きた。本稿では、この新しいボールド貯蔵システムの概念と、本貯蔵システムの除熱技術および遮へい技術に関する研究結果について報告する。

2 水平流方式ボールド貯蔵システムの概念

ボールド方式には、貯蔵室内での冷却空気流路の違いにより、さらに垂直流方式と水平流方式とに分けられる。それらの方式の概要を Fig.1 に示す。ボールド方式の代表的な構造では、使用済み燃料はキャニスタと呼ばれる円筒の金属容器に封入され、これを建屋側に設けられた金属製円筒容器である収納管の中に入れて、その外側に空気を流して冷却しながら貯蔵する。この構造では、使用済み燃料はキャニスタと収納管の2つの容器によって二重に密封され、容器の破損による放射性物質の漏洩を防止する。垂直流方式では、さらに収納管の外側に円筒状の通風管を設け、冷却空気を収納管と通風管の間に下から上へと流す。これに対して、水平流方式では通風管を設けず、貯蔵室の吸気ダクト側から排気ダクト側へと収納管を横切るような形で冷却空気を流す。両方式とも、使用済み燃料からの熱によって暖められた排気ダクト内の空気と外気の温度差（密度差）によって発生する駆動力により冷却空気を流す自然循環方式である。冷却空気の流量や排気温度は(1)式に示すとおり、駆動力と空気流路での圧力損失とのバランスによって決まる。

$$\rho \cdot g \cdot H \cdot T = 0.5 \cdot \rho \cdot U^2 \quad (1)$$

ここで、 β : 空気の膨張率 (K^{-1})、 ρ : 空気の密度 (kg/m^3)、 g : 重力加速度 (m/s^2)、 H : 駆動力に寄与する高さ 排気ダクト高さ (m)、 T : 排気ダクト内と外気の温度差、 λ : 流れの圧力損失係数 (-)、 U : 代表流速 (m/s) である。垂直流方式では、通風管で冷却空気を収納管表面に集め、空気流速を大きくして冷却性能を保持しているのに対し、水平流方式では、通風管などの流れの抵抗となる構造物を最小限にして、

The concept of cross flow type vault storage system and evaluation of heat removal and radiation shielding efficiency by Naoki Kumagai (naoki_kumagai@pis.hitachi.co.jp), Takashi Nishi, Masashi Shimizu, Yuichi Morimoto, Masashi Od
本稿は、日本原子力学会「2000年秋の大会」における講演内容に加筆したものである。

1 (株)日立製作所 電力・電機グループ 電力・電機開発研究所 Power & Industrial Systems, Power & Industrial Systems R & D Laboratory, Hitachi Ltd. 〒319-1221 茨城県日立市大みか町 7-2-1

2 (株)日立製作所 電力・電機グループ 原子力事業部 燃料サイクル部 Power & Industrial Systems, Nuclear Systems Division, Nuclear Fuel Cycle Engineering Dept., Hitachi Ltd. 〒317-8511 茨城県日立市幸町 3-1-1

3 日本原子力研究所 東海研究所 Japan atomic Energy Research Institute, Tokai Research Establishment 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

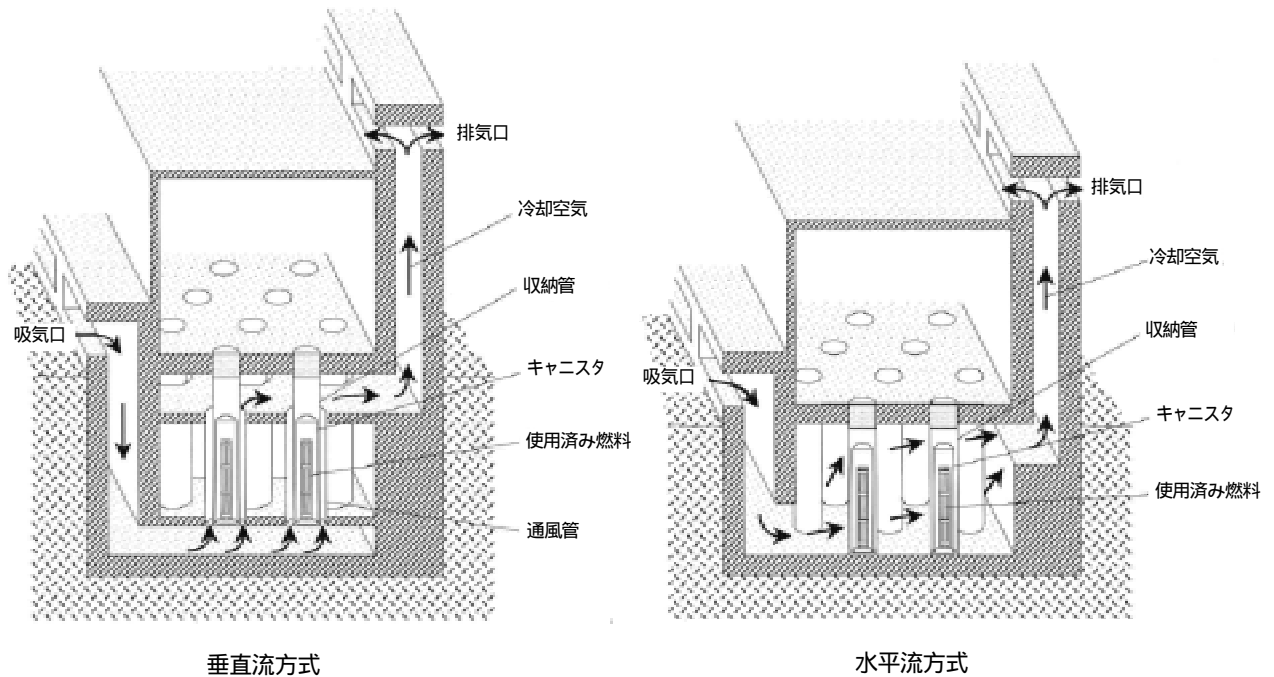


Fig.1 Typical structure of the vault storage facility

圧力損失係数を小さくすることで、全体の空気流量を増やしている。

本研究では、貯蔵室内の構造がシンプルでコスト低減が期待できる、水平流方式によるポルト貯蔵システムの実用化をめざし、より高性能なポルト貯蔵システムの概念を構築した[1]。Figure2に本水平流方式ポルト貯蔵施設の概念を示す。本施設の大きな特徴は、1本の収納管にキャニスタを上下に2段に積み、より高密度に貯蔵可能とした点にある。しかし、技術的課題として、キャニスタや収納管等の構造部材強度とともに、冷却空気の流れの最適化が重要となる。水平流方式の場合、貯蔵室内の空気の流れは、吸気ダクトより排気ダクトへと流れる水平方向の流れの他に、空気が暖められて起こる垂直方向の流れが混在したものとなる。そこで、水平方向への空気の流れを積極的に作り出して使用済み燃料を均等に除熱するため、本施設では上下のキャニスタの境に

あたる高さに流路仕切板を設けている。しかしこの場合、上下段に分けられた流路へ冷却空気を適切に配分する必要がある。そこで、熱流動解析を用いて貯蔵施設の除熱性能評価を行うとともに、熱流動解析手法の検証を目的として、スケールモデルによる除熱試験を実施した[2]。

3 除熱評価試験と熱流動解析

3.1 除熱評価試験装置の概要と試験方法

試験装置は、実機での空気の流れの再現性（相似性）と製作性より、実規模のおよそ 1/5 スケールとした。試験装置の外観を Fig.3 に、試験装置の構造と温度および流速の計測位

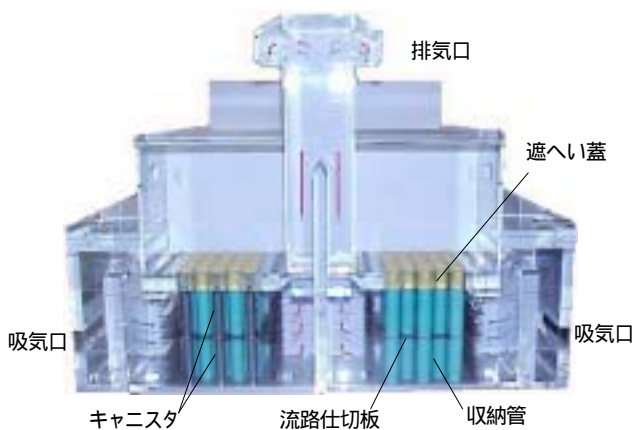


Fig.2 Concept of the high performance vault storage facility



Fig.3 Appearance of the experimental equipment

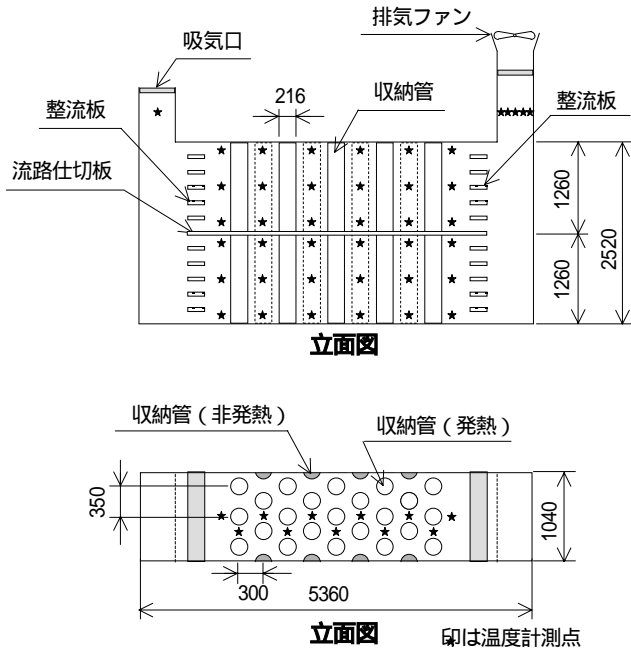


Fig.4 Structure and measurement point of the experimental equipment

置を Fig.4 に示す。模擬収納管内部には、発熱量可変のヒータを設け、使用済み燃料からの発熱を模擬した。また、空気流量を変更することで任意の駆動力および圧力損失を模擬できるように、排気側にはインバータで回転数を制御可能なファンを設けた。また、熱線流速計を用いて排気ダクトの一断面での流速を42カ所測定し、得られた流速分布より装置内を流れる空気流量を評価した。

実機における運用面での時間スケール(数日~数ヶ月)に比べて、冷却空気の流れや温度変化に対する時間スケール(数分~数日)は十分短いため、貯蔵時の空気の流れや温度分布はほぼ定常に達しているものと考えられる。そこで、試験においても、定常状態に達した後の温度を測定した。測定はほぼ1時間おきに24時間以上連続で実施し、得られた測定値の平均をもって温度の測定値とした。

3.2 熱流動解析方法

実機の貯蔵施設設計および安全性評価には熱流動解析による温度評価が不可欠である。そこで、熱流動解析手法の検証を行うため、試験体系での熱流動解析を実施した[2]。解析モデルは、計算時間の節約と今後の実機設計に当たったの利便性を考慮し、貯蔵室内構造の対称性を利用した2次元モデルとした。解析モデルの考え方について Fig.5 に示す。貯蔵施設の構造は、両側の壁面近傍を除いて収納管列単位に対称性を有している。そこで、冷却空気の流れる方向に対して1列分のみ取り出してモデル化し、さらに、収納管より受ける圧力損失を解析モデルの中に組み込むことで、解析モデルを2次元化することとした。このとき用いた圧力損失は以下の(2-4)式を用いた[3]。

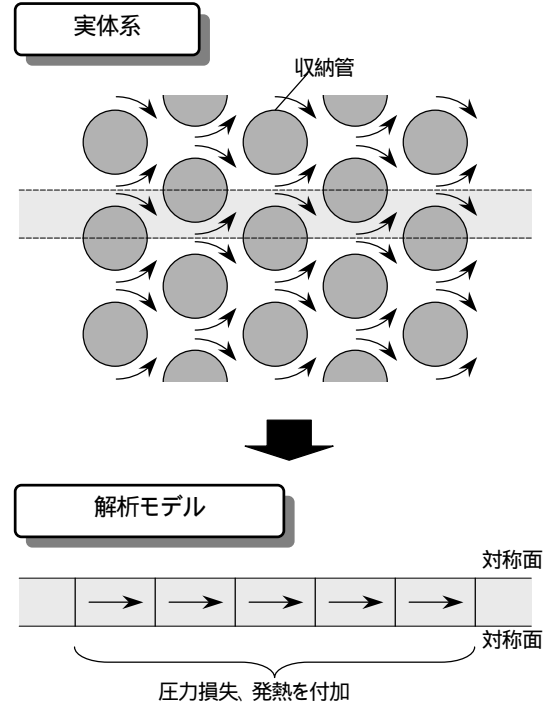


Fig.5 Illustration of the thermal fluid dynamics calculation model in the storage room

$$P = 0.5 \cdot \rho \cdot N \cdot U_{max}^2 \tag{2}$$

$$= \rho \cdot \left[1 - \exp\left\{ - (Re_{max} + 200) / 1000 \right\} \right] \tag{3}$$

$$F_1 = F_f / Re_{max}, \quad F_f = F_r / Re_{max}^{0.25} \tag{4}$$

ここで、 P : 圧力損失 (Pa), N : 空気の流れに直交する方向の収納管列数 (-), ρ : 空気の密度 (kg/m^3), U_{max} : 収納管の間の最も狭い部分での空気の平均流速 (m/s), Re_{max} : 流速に U_{max} , 長さに収納管の直径を取ったときのレイノルズ数 (-), F_1, F_f : 収納管の配置より決まる定数, 本試験装置では $F_1 = 78, F_f = 4.1$, である。使用済み燃料からの熱についても、収納管の位置に当たる部分の流体メッシュに直接熱量を加えることにより模擬した。また、浮力の効果はブシネ近似で取り扱い、乱流モデルには $k-\epsilon$ モデルを使用した。

3.3 試験および解析結果

試験および解析より得られた貯蔵室内の空気温度分布を Fig.6 に示す。試験による温度分布は、Fig.4 に示した温度計測点での値を用いて描いたものである。試験結果と解析結果を比較すると、両者はほぼ等しい分布を示しており、本解析手法により貯蔵室内の温度分布を精度良く評価できるものと考えられる。また、空気流量が減少することで貯蔵室の上部付近に高温の領域が発生しているが、これを反映して、設計にあたっては空気流量が十分流れるように考慮することとし

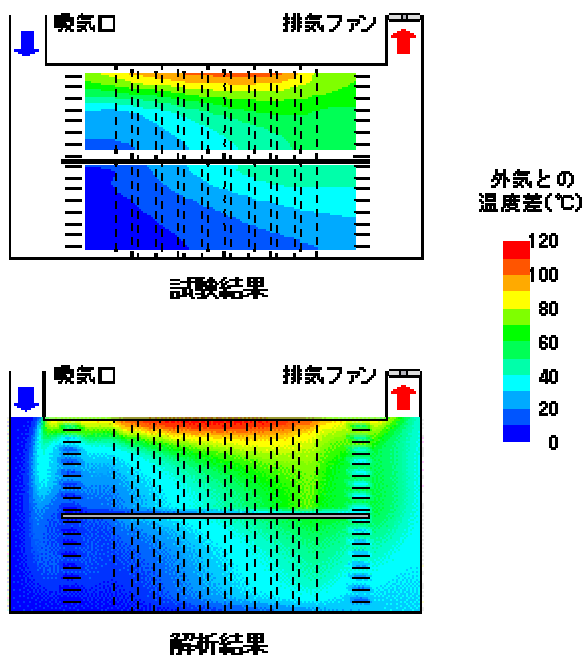


Fig.6 Air temperature distributions in the storage room of the experimental equipment

た。

4 施設の試設計と除熱・遮へい性能評価

4.1 設計の前提条件と貯蔵施設構造

次に、本貯蔵方式による施設の試設計を行った。将来、ポルト貯蔵施設が実用化される頃には、高燃焼度燃料が主流となっていると考えられるため、高燃焼度燃料を貯蔵対象燃料として想定し、施設の設計を行った[4]。想定した燃料の詳細は Table1 に示す。施設の設計に当たっては、貯蔵規模は 5000MTU を想定し、除熱性能のみではなく、遮へい性能も考慮しながら構造最適化を進め[5-7]、最終的に貯蔵密度 1.0MTU/m²の施設において、除熱性能、遮へい性能ともに必要な制限条件を満たすことを確認した[4,7]。

構造検討後の本貯蔵施設を Fig.7 に示す。構造最適化を進めた結果、まず、貯蔵室内の吸気ダクト、排気ダクト下部に段構造 (Fig.7-) を設けることで、冷却空気の上下段への流量配分と各段での流れの最適化を図り、空気温度分布が均一になるようにした。また、遮へい構造として、従来用いられていたダクト内の迷路板構造に変えて、貯蔵室内の収納管の前後に管を並べ (Fig.7-)、遮へい構造による圧力損失の増

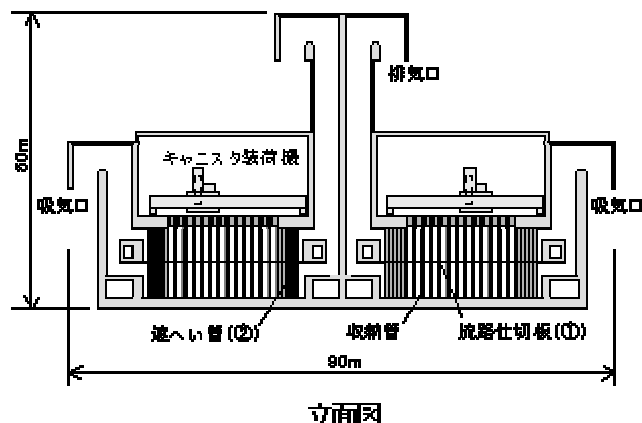


Fig.7 Structure of the vault storage facility designed for high burnup fuels

加を最小限に抑えた。

4.2 除熱性能評価

4.2.1 評価方法

本貯蔵施設に対し、必要な除熱性能を有することを確認するため、使用済み燃料の最高温度評価を行った。温度評価は、大きく分けて3つのステップで行った。まず、施設内を流れる冷却空気の流量を、(1)式の排気ダクトでの駆動力と全体の圧力損失の関係と、(5)式の発熱量と空気温度の関係を用いて求めた。

$$Q = \rho \cdot G \cdot C_p \cdot T$$

ここで、 Q ：使用済み燃料の発熱量の合計 (W)、 ρ ：空気の密度 (kg/m³)、 G ：冷却空気の流量 (m³/s)、 C_p ：空気の比熱 (J/kgK)、 T ：空気の温度上昇量 (K)、である。次に、得られた空気流量を用いて、3.2節と同様の方法にて熱流動解析を実施し、貯蔵室内の空気温度分布および流速分布を求めた。そして最後に、収納管内部の伝熱解析を実施し、使用済み燃料の温度を評価した。伝熱解析は、収納管の輪切り断面での2次元モデルで行った。このモデルでは、収納管やキャニスタの軸方向への熱移動がなく、実際の現象に比べて高い温度が得られるため、保守的な評価法であると言える。収納管温度は、熱流動解析で得られた、貯蔵室内の空気温度と空気流速より求めた熱伝達率を用いて算出し、伝熱解析の境界条件として与えた。このとき用いた熱伝達率の評価式を(6)式に示す[8]。

$$h = 0.35 \cdot \left(\frac{v}{d} \right) \cdot (Y/X)^{0.2} \cdot Re_{max}^{0.6} \cdot Pr^{0.36}$$

ここで、 h ：熱伝達率 (W/m²K)、 λ ：空気の熱伝導率 (W/mK)、 d ：収納管の直径 (m)、 X 、 Y ：空気の流れ方向および流れに垂直な方向の収納管ピッチ (m)、 Re_{max} ：レイノルズ数 ((3)式と同様)、 Pr ：空気のプラントル数 (-)、である。

Table1 Specification of the high burnup spent fuels.

項目	想定内容
燃料タイプ	BWR Step- 相当
燃焼度	58.5GWd/MTU
冷却年数	5年

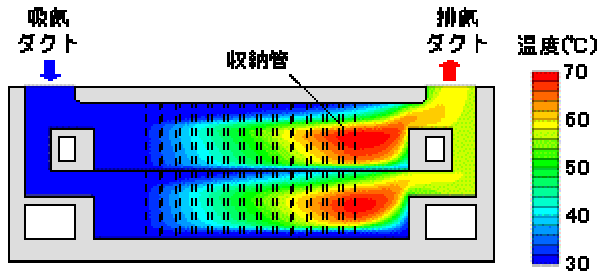


Fig.8 Air temperature distributions in the storage room of the storage facility for high burnup fuels

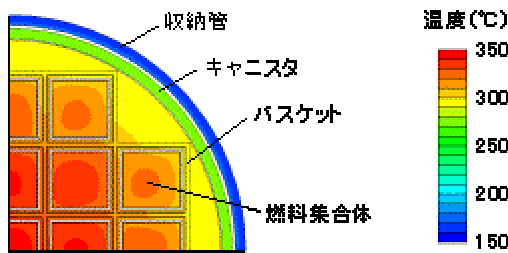


Fig.9 Temperature distributions in the storage tube

4.2.2 評価結果

Figure8 に、熱流動解析で得られた貯蔵室内の空気温度分布を示す。空気温度分布は上下段でほぼ同様の形状であり、また局所的な高温領域も見られないことから、空気の流れはほぼ理想的な状態になっていると考えられる。この空気の高温度を用いて収納管内部の伝熱解析を行った結果を Fig.9 に示す。燃料の最高温度は 347 を示し、本施設は必要な除熱性能を有することを確認した。

4.3 遮へい性能評価

4.3.1 評価方法

本貯蔵施設の遮へい性能として、管理区域境界として給排気口の線量と、貯蔵施設から敷地境界線量の制限を満たす位置までの距離を評価した。貯蔵室の周囲は 1m を超える厚いコンクリートに覆われているため、直接線による寄与は小さく、給排気ダクトによるストリーミングが遮へい評価上重要となる。そこで、給排気口における線量評価を、3次元モンテカルロコード MCNP-4B を用いて評価した。計算時間の短縮を図るため、使用済み燃料より貯蔵室までの体系と、貯蔵室より給排気口までの体系に分け、前者より貯蔵室出口での線量を求め、後より得られた給排気ダクトでの減衰率を乗じることで給排気口での線量を評価した。また、敷地境界での線量制限を満たす距離の評価は、MCNP-4B を用いて、給排気ダクトを線源領域とした貯蔵施設外側の解析により評価した。

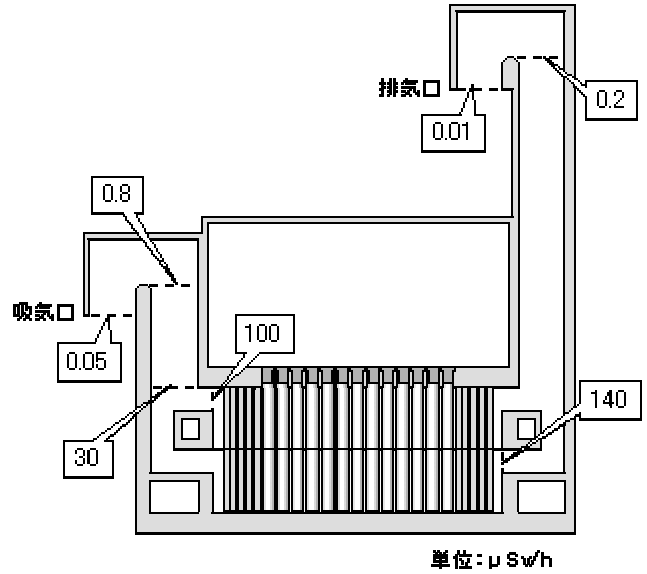


Fig.10 Dose-equivalent rate of the storage facility for high burnup fuels

4.3.2 評価結果

貯蔵室内の線量当量率評価結果を Fig.10 に示す。評価の結果、給排気口での線量当量率は共に 0.05 μSv/h 以下となり、管理区域境界での制限値である 1.8 μSv/h を下回ることを確認した。次に、貯蔵施設からの距離と線量当量率の関係を Fig.11 に示す。敷地境界での線量制限値を 50 μSv/y と仮定すると、貯蔵施設から 25m 離れた地点で制限値を満足しており、敷地境界線量についても十分な遮へい性能を有することを確認した。

5 まとめ

低コスト、高密度貯蔵が可能な方式として将来の実用化が期待されるボールド貯蔵システムについて、水平流方式でキャニスタを2段積みし、より高密度化した貯蔵施設の概念を考案した。1/5 スケールの除熱試験を実施し、2次元モデルを用いた熱流動解析手法が有効であることを示すと共に、除熱試験および熱流動解析を用いて構造最適化を図り、高燃焼

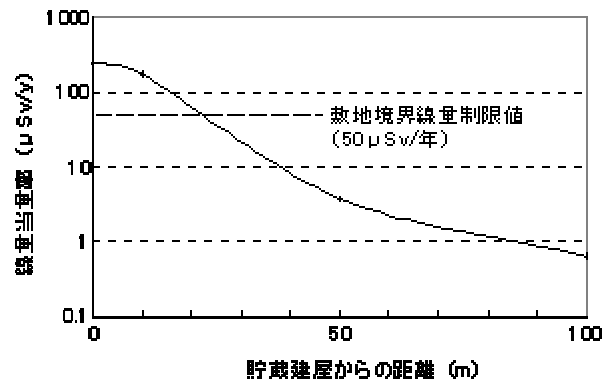


Fig.11 Dose-equivalent rate on the outside of the storage facility for high burnup fuels

度燃料を対象とした貯蔵施設の試設計を行った。この貯蔵施設に対し、除熱性能および遮へい性能をそれぞれ評価した結果、共に必要な性能を有することを確認した。

参考文献

- [1] 田辺雅彦 他: 使用済燃料の乾式貯蔵技術の開発() 高性能ボルト貯蔵施設の概念。日本原子力学会 1998 春の年会, 近畿, 3月26-28日, H1 (1998)。
- [2] 小田将史 他: 使用済燃料の乾式貯蔵技術の開発() 高性能ボルト貯蔵施設の除熱評価。日本原子力学会 1998 春の年会, 近畿, 3月26-28日, H2 (1998)。
- [3] ドイツ技術者協会 編, 花王株式会社, 木内学 訳: 熱計算ハンドブック, 日本能率協会, 東京, pp.Ld1-Ld7 (1988)。
- [4] 熊谷直己 他: 使用済燃料の乾式貯蔵技術の開発() 高性能ボルト貯蔵施設の除熱特性評価。日本原子力学会 2000 春の年会, 愛媛, 3月28-30日, D35 (2000)。
- [5] 熊谷直己 他: 使用済燃料の乾式貯蔵技術の開発() 高性能ボルト貯蔵施設の除熱特性評価。日本原子力学会 1999 春の年会, 広島, 3月22-24日, I1 (1999)。
- [6] 柴田圭一郎 他: 使用済燃料の乾式貯蔵技術の開発() 高性能ボルト貯蔵施設の線量解析。日本原子力学会 1999 春の年会, 広島, 3月22-24日, I2 (1999)。
- [7] 森本裕一 他: 使用済燃料の乾式貯蔵技術の開発() 高性能ボルト貯蔵施設の遮蔽性能向上策。日本原子力学会 2000 春の年会, 愛媛, 3月28-30日, D36 (2000)。
- [8] 日本機械学会 編: 伝熱工学資料 改訂第4版, 丸善, 東京, pp.64 (1986)。