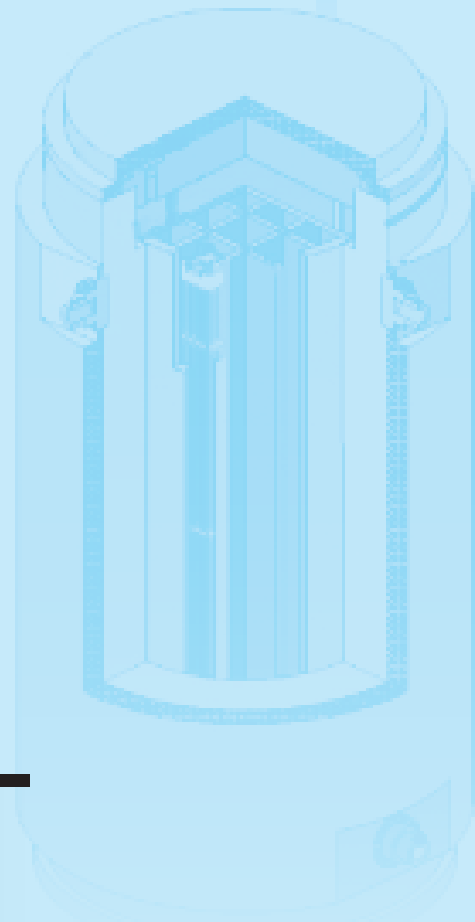


# 第Ⅲ部

## 使用済燃料等の輸送・貯蔵技術

### 第6章

# 金属キャスク 貯蔵技術



6-1 密封評価 .....	96
6-1-1 航空機エンジンの衝突に対する閉じ込め性能評価	
6-1-2 取扱中の落下事故に対する密封性能	
6-1-3 長期密封性能の評価	
6-2 除熱評価 .....	101
6-2-1 貯蔵施設の除熱模型試験方法の提案	
6-2-2 キャスクの伝熱特性検討ならびに除熱性能の改善	

## 6-1 密封評価

### 6-1-1 航空機エンジンの衝突に対する閉じ込め性能評価<sup>1,2)</sup>

#### (1) 目的

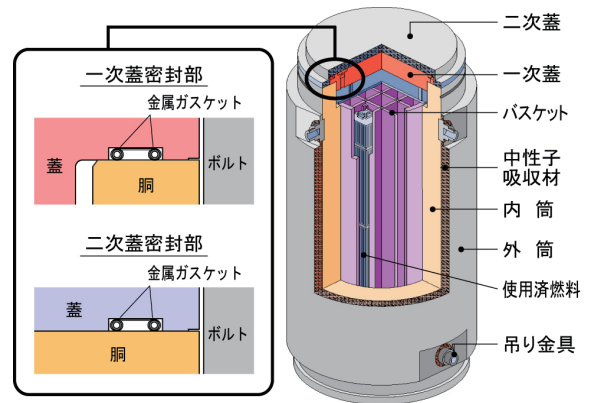
重要な原子力施設のシビアアクシデントに関する評価として、欧米では、民間航空機衝突に対する安全性評価が実施されている。しかし、設定条件や評価方法が非公開となっており、その安全性評価の詳細を把握することが困難である。一方、我が国においても、使用済燃料貯蔵施設に関するシビアアクシデントとして、安全設計要件を上回る民間航空機衝突が想定されており、貯蔵施設内に貯蔵される金属キャスク（使用済燃料を収納するための金属製の乾式容器で、直径約2.5m、高さ約6m、質量約120t：図6-1-1）の閉じ込め性能への影響を、科学的に明らかにする必要がある。

本項では、貯蔵施設への民間航空機の衝突により、航空機エンジンが施設内に侵入し、金属キャスク上面に垂直方向から衝突した場合を想定し、衝撃荷重を受ける金属キャスク密封部（金属ガスケット）の挙動を試験および解析により明らかにし、シビアアクシデントに対する金属キャスクの閉じ込め性能を評価した。

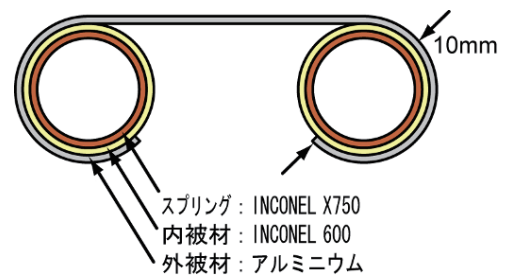
#### (2) 実物大蓋部モデルを用いた高速飛来物垂直衝突試験

図6-1-2に、高速飛来物を用いた衝撃試験装置の概要を示す。本試験装置では、飛来物内部に充填した推進薬により、飛来物が被衝突体に誘導するランチャー上を加速しながら進み、所定の速度で被衝突体に衝突する仕組みとなっている。

図6-1-3に、垂直衝突試験の概要を示す。衝突試験では、航空機エンジンを2/5に縮尺した飛来物（直径50cm、質量300kg）を用いて、横向きに設置された実物大蓋部モデル（蓋構造は実機と同様に一次蓋と二次蓋からなる二重蓋構造で蓋間にヘリウムガスを充填・高さ方向縮尺率1/3）に対し、鉛直方向から二次蓋中央部に速度66m/secで衝突させ、衝撃荷重を載荷した。試験では、キャスクの蓋や本体各部の変位量、ならびに蓋間圧力や密封部金属ガスケットの漏えい率の測定を行い、以下の結果を得た。



金属キャスクの密封部



金属ガスケットの構造

図6-1-1 金属キャスクの概要

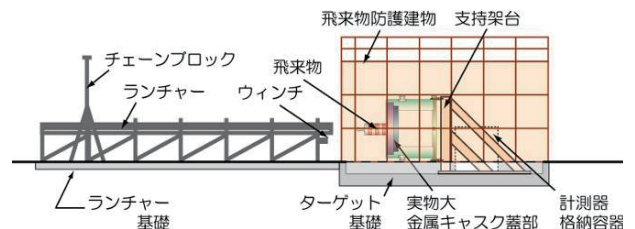


図6-1-2 高速飛来物衝撃試験装置の概要

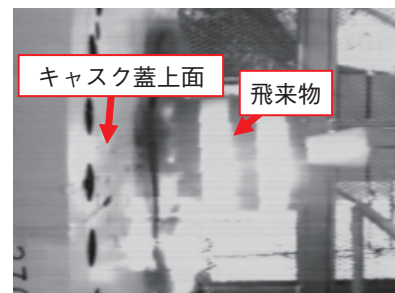


図6-1-3 垂直衝突試験の概要

- ・一次蓋や二次蓋の蓋締付ボルトや密封境界面に、塑性変形は発生していない。
- ・二次蓋の漏えい率については、衝突直後に発生する口開き変位により検知レベル  $1.0 \times 10^3 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}$  を超える漏えいが発生したものの、衝突荷重の载荷終了後は口開き変位が初期の値に復元したため、漏えい率は  $1 \times 10^6 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}$  以下の値を保持する結果となった。なお、瞬間的な二次蓋からの漏えいにより、軽微な蓋間の圧力変化（初期値 305kPa から 10kPa の低下）が発生した。
- ・一次蓋ガスケット部の漏えい率は、衝突後も  $1.0 \times 10^7 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}$  オーダーの値を保持しており、金属キャスク内部の負圧が直ちに損なわれることはない（図 6-1-4）。

### (3) 実機金属キャスクの密封性能の数値解析評価

(2)で実施した衝撃試験に対し、解析コード LS-DYNA を用いた金属ガスケット密封境界部に対する閉じ込め性能評価（図 6-1-5）を行い、

- ・モデル化の容易な金属材料を除くコンクリートや樹脂材料などについて検証された物性モデルを使用すること
- ・蓋部構造および本体との取り合い条件（ギャップなど）を忠実にモデル化すること
- ・蓋ボルトの初期応力を考慮し、応力変動を評価できる要素あるいはモデルを適用すること

などに留意することにより、密封部の衝撃応答（変形状態や漏えい発生の有無）を再現できることを確認した。

なお、本研究は、経産省 原子力安全・保安院からの受託研究として実施したものである。

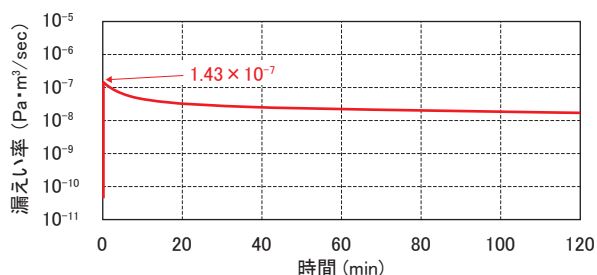
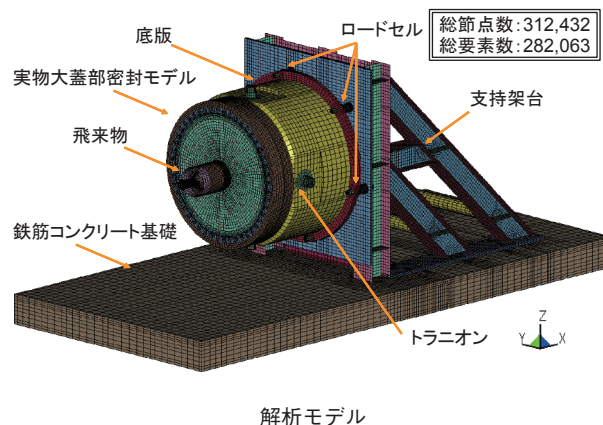


図6-1-4 一次蓋ガスケットで測定された漏えい率

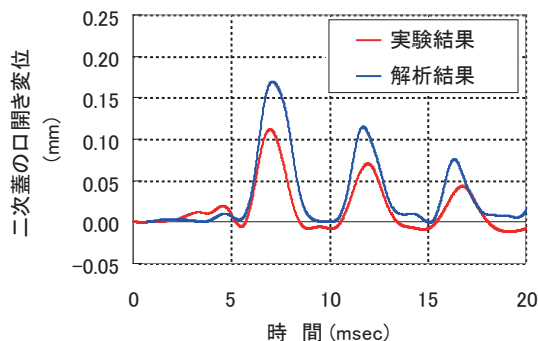
### 6-1-2 取扱中の落下事故に対する密封性能<sup>3,4)</sup>

使用済燃料貯蔵用金属キャスクの輸送中の安全性に対する研究としては、落下事故を対象として、輸送規則で定められる落下要件に基づき、これまでに多くの試験や解析が実施されている。しかし、落下の際の衝撃荷重が作用することによる密封部のボルトの緩みや、ガスケットのずれを原因とした瞬間的な漏えい量の評価事例は少なく、万が一のハンドリング事故を想定した安全評価のソースターム決定に関する基礎データの蓄積が必要である。

このようなことから、貯蔵施設内でのハンドリング事故を想定して、緩衝体を装着しない実物大金属キャスクを用いて落下試験（図 6-1-6）を実施し、瞬時の漏えい率計測、キャスク蓋変位計測を行い、それらの関係および総漏えい量を求めること目的とした。



解析モデル



二次蓋口開き変位の解析結果と試験値の比較

図6-1-5 実機金属キャスクの閉じ込め性能の数値解析評価

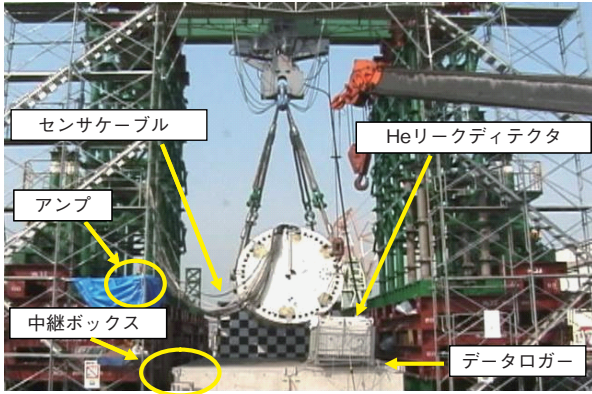


図6-1-6 落下試験の様子

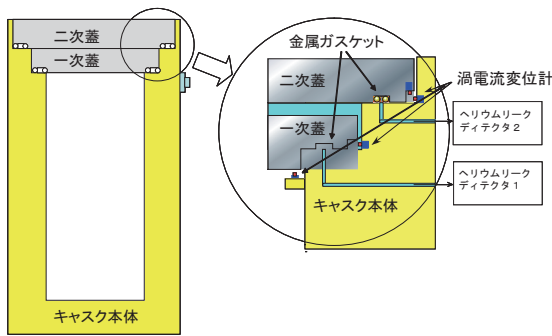


図6-1-7 計測箇所

図6-1-7は蓋のずれ量測定に用いた渦電流変位計および漏えい率の計測箇所を示したものである。

### (1) 試験結果

実物大金属キャスク（直径約2.5m、長さ約5.5m、重さ約120t）を用いて、2ケースの落下試験を行った。一つは、水平状態で1mの高さから落下させる水平落下試験、もう一つは、水平状態で1mの高さにし、後部トランシオンを回転中心とした回転衝突試験である。これらの試験を実施し、以下の知見が得られた。表6-1-1は、水平落下試験結果、表6-1-2は、回転衝突試験結果をまとめたものである。

- ・ 水平落下時におけるトランシオンの床版への貫入量は100～120mmであり、コンクリート床版内の鉄筋まで到達した。また、回転衝突時におけるトランシオンの貫入量は約50mmであり、鉄筋までは到達しなかった。
- ・ 落下試験における蓋の横ずれ量は、水平落下試験で最大0.3～0.4mm（図6-1-8）、回転衝突試験で最大0.6～1mmであった。また、回転衝突試験では、一次蓋

表6-1-1 水平落下試験結果

項目	試験結果	備考	
落下方向の平均加速度	本体胴中央部	約490m/s <sup>2</sup>	本体中央下部、落下方向
	蓋中央部	約160m/s <sup>2</sup>	一次蓋中央、落下方向
床版への貫入量		100mm程度	
一次蓋	横ずれ*	約0.4mm	
	口開き	口開き側への有意な変化なし	
	ボルト軸応力	—	
二次蓋	横ずれ**	約0.4mm	
	口開き	口開き側への有意な変化なし	
	ボルト軸応力	変化なし	
最大漏えい率	一次蓋	2.38 × 10 <sup>-10</sup> Pa・m <sup>3</sup> /s	落下から22秒
	二次蓋	2.85 × 10 <sup>-9</sup> Pa・m <sup>3</sup> /s	落下から34秒
6時間後の漏えい率	一次蓋	1.52 × 10 <sup>-11</sup> Pa・m <sup>3</sup> /s	B.G.※8.42 × 10 <sup>-12</sup> Pa・m <sup>3</sup> /s
	二次蓋	7.90 × 10 <sup>-12</sup> Pa・m <sup>3</sup> /s	B.G.※4.17 × 10 <sup>-11</sup> Pa・m <sup>3</sup> /s
圧力		落下直後は変化なし	落下後、日射によるヘリウム温度の上昇あり

\* 一次蓋の初期クリアランス: 1.11mm (蓋が中心に設置してある場合)  
 \*\* 二次蓋の初期クリアランス: 0.65mm (蓋が中心に設置してある場合)  
 ※ バックグラウンド(落下試験前の値)

表6-1-2 回転衝突試験結果

項目	試験結果	備考	
落下方向の平均加速度	本体胴中央部	約160m/s <sup>2</sup>	本体中央下部、落下方向
	蓋中央部	約470m/s <sup>2</sup>	一次蓋中央、落下方向
床版への貫入量		50mm程度	
一次蓋	横ずれ*	約0.6mm	
	口開き	約0.11mm	
	ボルト軸応力	—	
二次蓋	横ずれ**	約0.6mm(45°方向) 約1mm(0°方向)	0°、180°方向はフランジと衝突
	口開き	変化なし	
	ボルト軸応力	約50MPaの増加	
最大漏えい率	一次蓋	3.86 × 10 <sup>-9</sup> Pa・m <sup>3</sup> /s	落下から54秒
	二次蓋	8.37 × 10 <sup>-9</sup> Pa・m <sup>3</sup> /s	落下から24秒
6時間後の漏えい率	一次蓋	4.91 × 10 <sup>-10</sup> Pa・m <sup>3</sup> /s	B.G.※1.99 × 10 <sup>-12</sup> Pa・m <sup>3</sup> /s
	二次蓋	2.64 × 10 <sup>-10</sup> Pa・m <sup>3</sup> /s	B.G.※1.43 × 10 <sup>-11</sup> Pa・m <sup>3</sup> /s
圧力		落下後6時間で0.006MPaの減少	

\* 一次蓋の初期クリアランス: 1.11mm (蓋が中心に設置してある場合)  
 \*\* 二次蓋の初期クリアランス: 0.65mm (蓋が中心に設置してある場合)  
 ※ バックグラウンド(落下試験前の値)

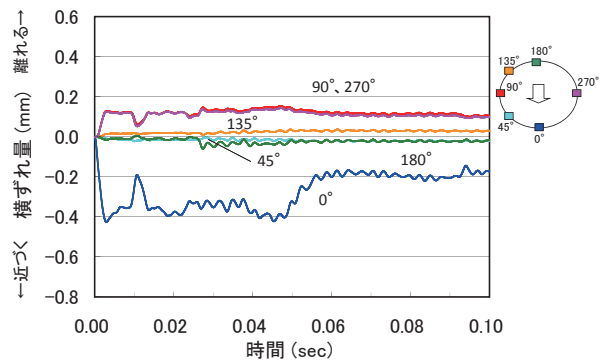


図6-1-8 一次蓋の横ずれ変位 (水平落下試験)



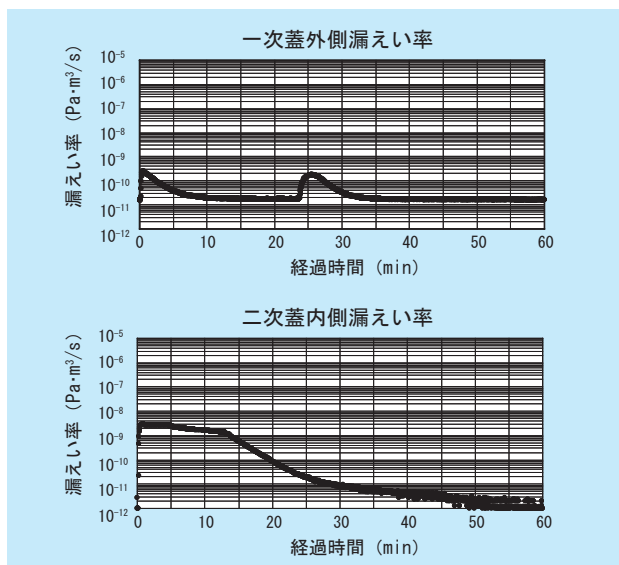


図6-1-9 漏えい率の時間履歴（水平落下試験）

において、0.1mmの口開きが計測された。

- 落下衝撃による蓋間ヘリウムの漏えい率をリアルタイムで計測した。落下試験時の瞬時漏えい率は、水平落下試験の一次蓋で  $2.38 \times 10^{-10}$  Pa·m<sup>3</sup>/s（図 6-1-9 上）、二次蓋で  $2.85 \times 10^{-9}$  Pa·m<sup>3</sup>/s（図 6-1-9 下）、回転衝突試験の一次蓋で  $3.86 \times 10^{-9}$  Pa·m<sup>3</sup>/s、二次蓋で  $8.37 \times 10^{-9}$  Pa·m<sup>3</sup>/s であった。なお、両試験とも試験前の漏えい率の値は、約  $1 \times 10^{-12}$  Pa·m<sup>3</sup>/s であった。また、計測された漏えい率を計測時間で積分することにより、総漏えい量を求めた。蓋間に充てんされているヘリウムの総漏えい量の初期値に対する割合は、水平落下試験で、 $9.61 \times 10^{-9}\%$ 、回転衝突試験で、 $8.45 \times 10^{-8}\%$  であり、ガスケットからの顕著な漏えいはなかった。

本試験結果に対しては、別途、試験解析を行い、蓋の横ずれおよび口開き挙動を試験結果と比較し、解析コードの整備を行った。また、今回の試験条件よりも過酷な転倒事象についても解析による評価を行った。また、今回用いたガスケットが未劣化ガスケットであることから、熱劣化させたガスケットを用いて蓋部スケールモデルによる試験を行うことにより、熱劣化ガスケットの評価を行った。

なお、本研究は、経産省 原子力安全・保安院からの受託研究として実施したものである。

### 6-1-3 長期密封性能の評価<sup>5)</sup>

使用済燃料の中間貯蔵で用いられる金属キャスクは、長期間にわたる信頼性の高い密封性能が求められるため、金属ガスケットで密封性能を担保する構造である。当所では、これまでに2種類の実物大蓋部モデルを用いた密封性能試験を約19年間以上行い、長期データを取得してきた。

#### (1) 試験装置、試験方法

本試験では、蓋構造およびガスケットが異なる2種類の実物大金属キャスク蓋部モデル（I型、II型モデルと呼ぶ）を使用した。試験体の概要を図 6-1-10、図 6-1-11 に示す。I型モデルは、二重Oリング型の金属ガスケットで、II型モデルのガスケットは、シングルOリング型の金属ガスケットとゴムガスケットの組み合わせである。各々のモデルに用いた金属ガスケットは以下の材料より構成されている。

I型：コアスプリング / インコネル

内被材 / インコネル、外被材 / アルミニウム

II型：コアスプリング / インコネル

内被材 / インコネル、外被材 / 銀

試験体内部には、使用済燃料の崩壊熱を模擬するためのヒーターを設置した。試験体温度は、貯蔵時の温度解析結果に基づき、一次蓋ガスケット部温度を160℃一定として制御した。一次蓋と二次蓋間の空間には、ヘリウムガスを充填し、二次蓋ガスケットの漏洩率のみを、ヘリウムリークディテクタを用いて定期的に測定した。

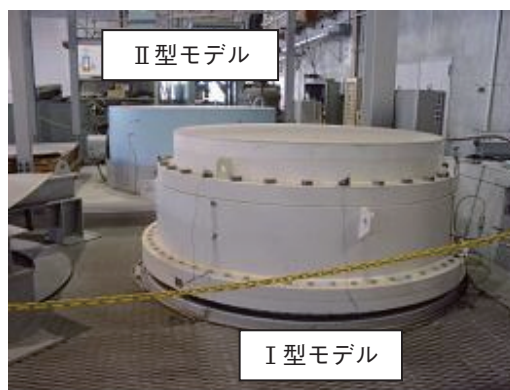


図6-1-10 試験体の外観

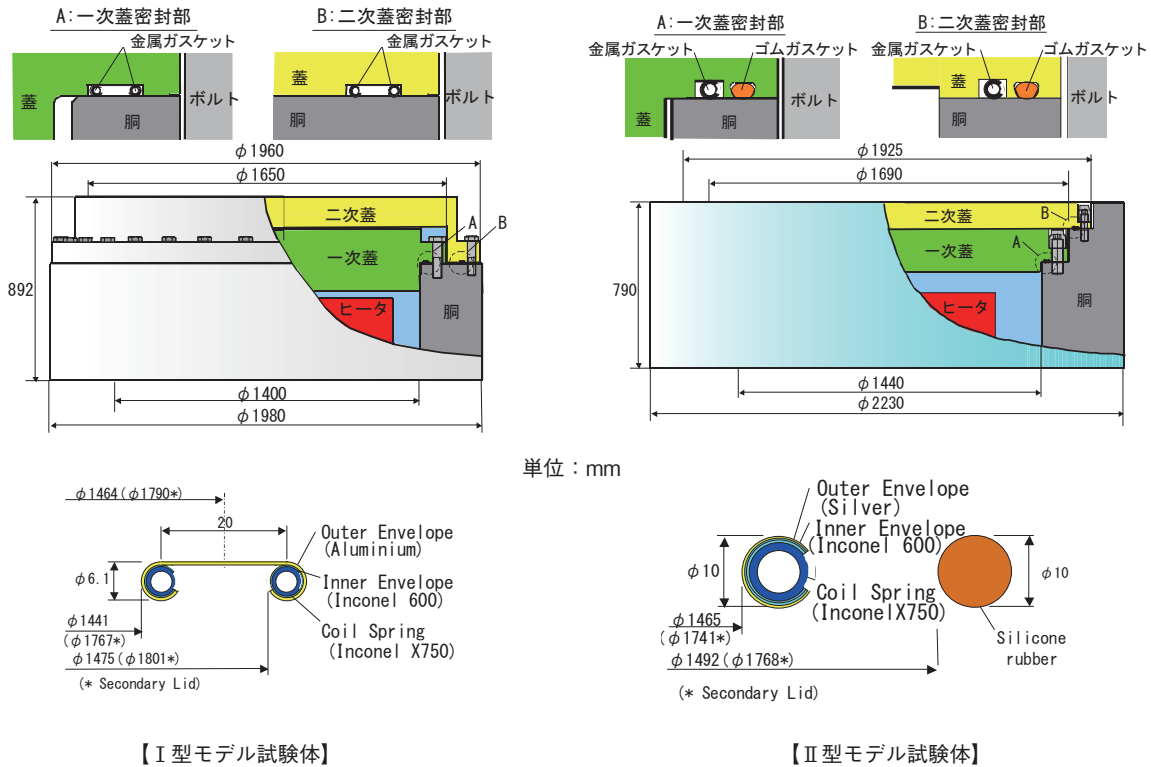


図6-1-11 試験体の構造

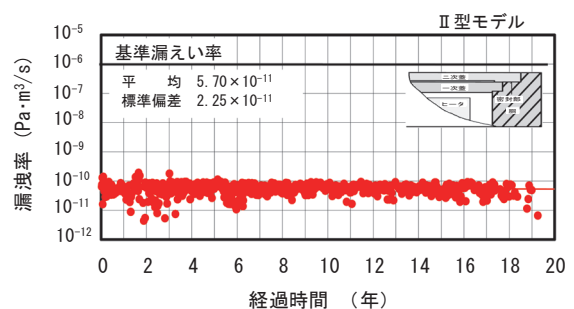
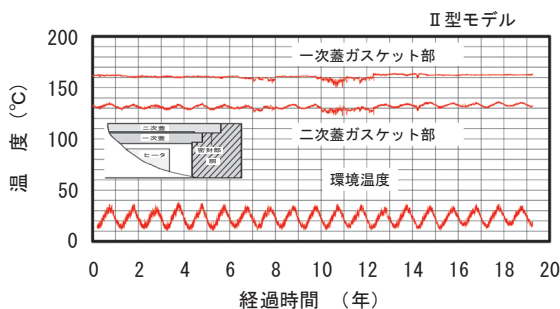
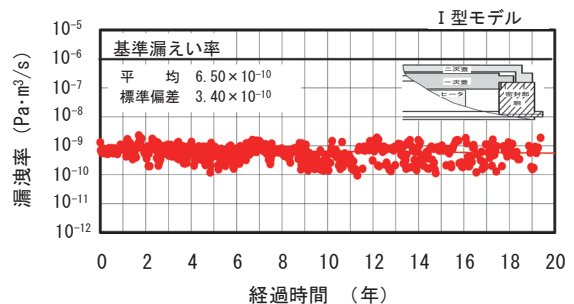
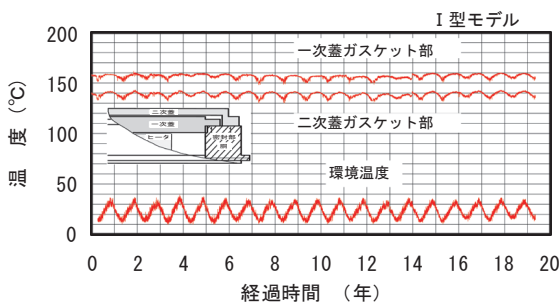


図6-1-12 試験体各部の温度履歴

図6-1-13 二次蓋ガスケットの漏えい率

(2) 試験結果

試験開始（平成2年10月）から平成22年1月までの試験体各部の温度および二次蓋の漏えい率の経時変化を、図6-1-12、図6-1-13に示す。試験では、一次蓋ガス

ケット温度を160℃一定にしており、二次蓋ガスケットの温度は、試験体の構造の違いにより、I型モデルでは約130℃、II型モデルでは約140℃となっている。試験開始から19年以上が経過したが、漏えい率の変化はな

く、いずれのモデルも試験開始時の良好な密封性能を保持していた。

### (3) 長期密封性能の評価

本試験は、一定温度条件で試験を実施しているが、実貯蔵時には、使用済燃料の崩壊熱の減衰により、キャスクの温度は時間経過とともに低下する。ガスケット温度を高温のまま保持することが漏えいに関する加速因子と考えると、ラーソン・ミラー・パラメーター (LMP) を用いて、長期密封性能の推定が可能となる。

$$LMP = T \times (16 + \text{Log}(t))$$

ここで、T：絶対温度 (K) t：時間 (h)

本試験結果から計算される平成22年2月時点でのLMP値 (LMPの定数を16と仮定した場合I型：8770、II型：8591) では漏えい率に変化がないことから、異なる温度履歴であっても、その温度履歴から計算されるLMP値が本試験でのLMP値に達するまでは、密封性能が健全であると評価できる。

金属キャスクのガスケット部の温度は、キャスクの構造や収納する使用済燃料の仕様により異なる。図6-1-14に、ガスケット温度の経時変化の計算値の例を示す。図中には、ガスケット温度の初期値を140、135、130、120℃にした場合の計算結果を示している。それぞれの温度履歴をもとに、LMPを計算し、その値が前述の試験結果から得られたLMP (I型：8770、II型：8591) に到達するまでの時間が密封性能の健全性を示す時間である。この健全性を示す時間とガスケット温度の初期値の関係は図6-1-15のようになる。この結果から、貯蔵期間が60年の場合、その期間、健全性を担保するためには、初期温度を134℃ (I型)、125℃ (II型) 以下にすればよいことが分かる。

なお、本研究は、経済産業省 原子力安全・保安院からの受託研究として実施したものである。

## 6-2 除熱評価

使用済燃料からは、崩壊熱と呼ばれる熱が長期間にわたって放出される。よって、使用済燃料を入れる容器であるキャスクやキャスクを収納する使用済燃料貯蔵施設

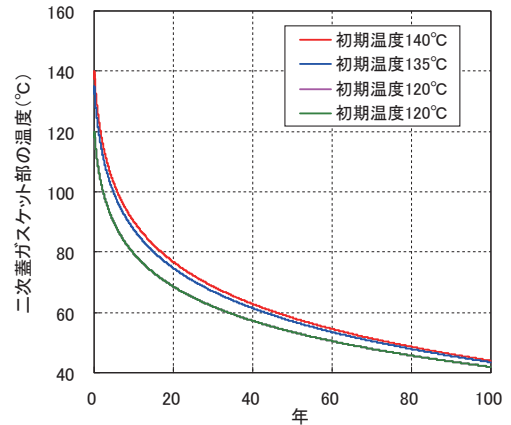


図6-1-14 ガスケット部温度の計算値の例

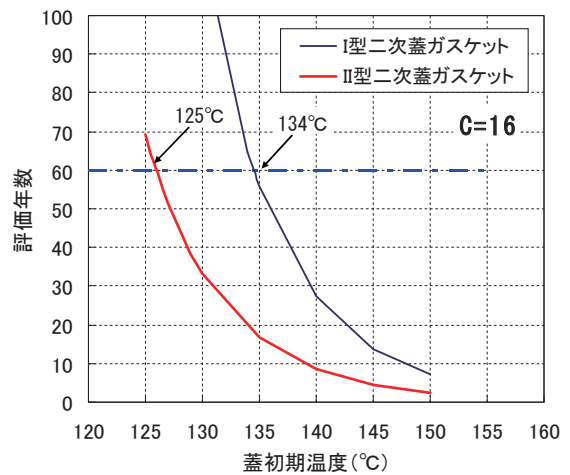


図6-1-15 ガスケット部初期温度と評価年数の関係

においては、安全に除熱できる機能を有していることが必要である。この除熱システムには、静的安全性と経済性の点で有利である自然対流現象を利用した方式が多く用いられている。しかし、自然対流は、熱と流動抵抗の微妙なバランスで成立する現象であることから、温度や流量を精度よく予想することは困難である。また、この自然対流を活用する上で、さらに除熱性能を向上させる方策の提案も課題の一つとなっている。

### 6-2-1 貯蔵施設の除熱模型試験方法の提案<sup>1)</sup>

原子力に関わる機器や施設の除熱設計においては、静的安全のため、自然対流現象を利用したものが多々あり、その成立性を模型試験で実証するには、相似則の使用が不可欠である。しかし、自然対流相似則の適用性について

て、模型の縮尺率、発熱条件および作動流体の種類を系統的にまとめたものはない。より小さな模型や異なる流体を用いて相似則を考慮した試験方法が確立されれば、研究開発コストの低減および計測の容易さの点で、メリットは大きい。

このようなことから、本研究では、自然対流現象を利用した施設の一例として、金属キャスク貯蔵施設を対象とし、縮尺模型を用いた試験を行い、自然対流相似則の適用範囲を明らかにし、相似則を考慮した模型試験方法を提案した。

図6-2-1は、貯蔵施設内の自然対流の特徴を示したものである。

ここでは、金属キャスクが貯蔵施設内におかれた際の熱流動現象を、縮尺模型試験で模擬するための相似則の検討を行った。

図6-2-2は、試験装置の概要を示したものである。装置は、水槽内に金属キャスクを模擬した発熱体（ヒータ模型）を設置している。ここでは、形状が相似で大きさの異なる3種類の試験装置を使用した。模型の縮尺率は、想定した実キャスク高さ5.5mに対して、1/22、1/42、1/56とした。さらに、発熱量（1.6～200W）および流体の種類（空気、水、グリセリン）をパラメータとした自然循環試験を実施した。

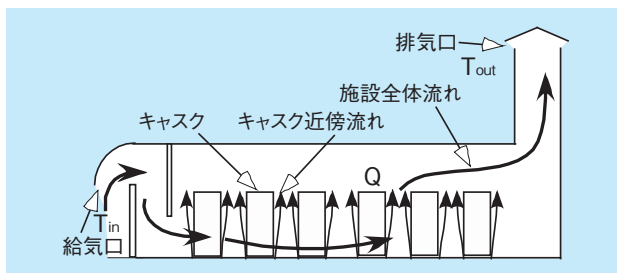


図6-2-1 金属キャスク貯蔵施設内の熱流動現象

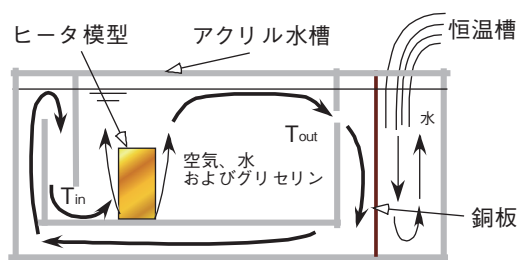


図6-2-2 試験装置

### (1) 試験成果

- (a) 施設内には、「キャスク近傍の流れ」とそれに伴って発生する「施設全体の流れ」の2つの特徴的な流れがあり、キャスク近傍の自然対流境界層は、全体流れと区別して取り扱う必要がある。また、キャスク近傍の流れに対しては、 $Ra^*$  数<sup>注1)</sup>を用いて整理することが可能であり、全体流れについては、 $Ri$  数相似<sup>注2)</sup>を実施と一致させることで、流れを模擬した模型試験を行うことができる（図6-2-1）。
- (b) 空気を用いた試験において、模型の縮尺率および発熱量を変化させて得られた水槽内の温度分布を無次元化して比較することにより、相似則を満足することを確認した。

図6-2-3は、模型の縮尺率および発熱量をパラメータとした9ケースの試験を実施し、それぞれの試験で計測された水槽内の最大温度と最少温度の差（ $\Delta T$ ）を用いて無次元温度分布を比較したものであり、パターンが類似することが分かった。また、図6-2-4は、 $Re$  数<sup>注3)</sup>に対する $\Delta T$ の規格化値であり、無次元化に使用した $\Delta T$ は、本相似則によると模型寸法と発熱量の関数（ $\Delta T \propto L^{-5/3} \times Q^{1/3}$ ）になっていることから、それぞれの試験条件に合わせて規格化（ $\Delta T^*$ ）した。その結果、平均値（ $\Delta T^*m$ ）に対して、約±20%のばらつき範囲内で一致することが分かった。

よって、本試験範囲においては、実キャスクの1/56縮尺模型（発熱体高さ約10cm）、発熱量1.6Wで模擬した試験も含まれており、この結果を用いて実施施設の熱流動現象を予測できる可能性があることが分かった。

- (c) 流体に水およびグリセリンを使った場合、自然循環流量が空気に比べて極めて少なくなることから、一巡流路の圧損係数が大きくなり、空気試験と $Ri$  数相似の試験にならないことが分かった。

注1)  $Ra^*$  数（修正レイリー数）：浮力の大きさを表す無次元数であり、自然対流場での層流と乱流の識別に用いる。温度差を用いた $Ra$  数に対して、熱流束を用いたものを特に修正 $Ra$  数という。

注2)  $Ri$  数（リチャードソン数）相似：浮力と慣性力の比率を同じにする相似条件であり、試験においては、装置の圧損係数を同一にすることを意味する。

注3)  $Re$  数（レイノルズ数）：慣性力と粘性力の比を表す無次元数であり、層流と乱流の識別に用いる。



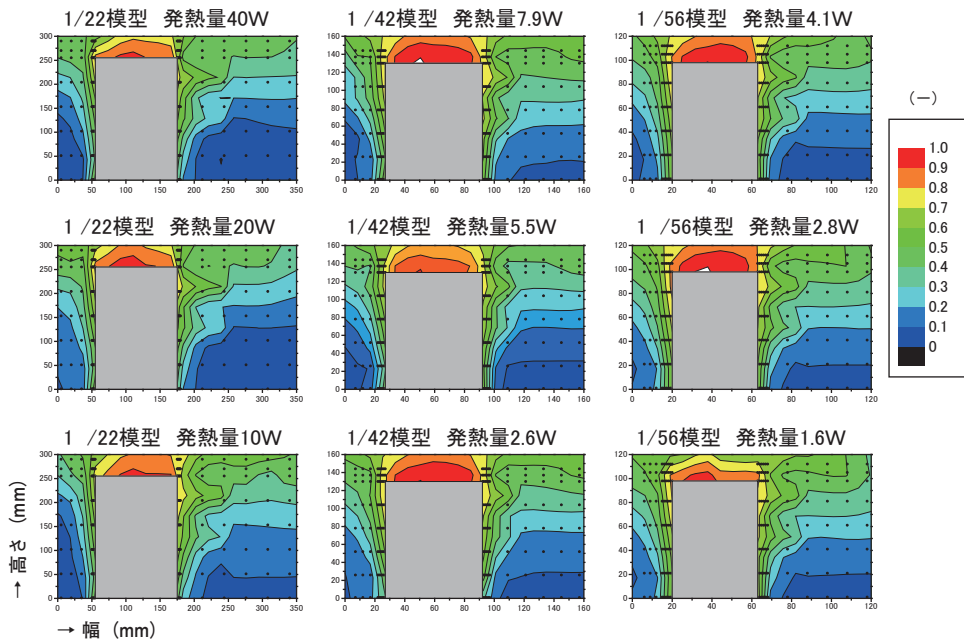
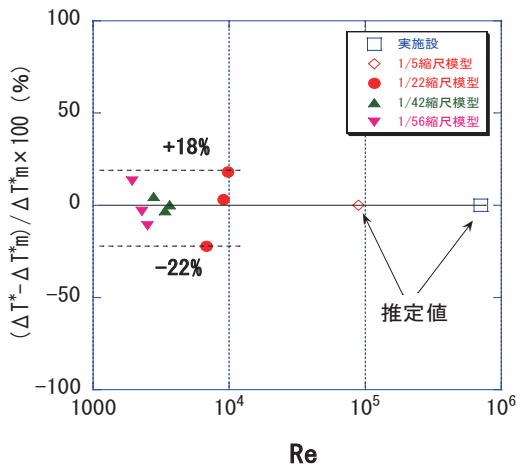


図6-2-3 無次元温度分布（流体に空気を用いた試験）



$$\Delta T^* \propto \frac{\Delta T}{L^{-5/3} \times Q^{1/3}}$$

$L$  : 模型寸法  
 $Q$  : 発熱量

図6-2-4 Re数に対するΔTの規格化値

以上、金属キャスク施設の熱流動現象を縮尺模型試験で模擬するために、流体には空気を用い、「キャスク近傍の流れ」と「施設全体の流れ」とに別々の相似則を考慮した試験方法を提案した。

(2) 今後の展開

相似則による実現象の予測をより高度化するには、さらにスケールアップした試験を実施し、本除熱模型試験手法の妥当性を確認することが必要である。

6-2-2 キャスクの伝熱特性検討ならびに除熱性能の改善<sup>2-4)</sup>

使用済燃料を収納する金属キャスクの貯蔵施設では、これまでに比べて発熱量の大きい高燃焼度燃料の貯蔵が予想される。よって、今後はキャスク表面の伝熱や貯蔵施設全体の除熱の性能を高めることが必要になる。これに対処するために、合理的なキャスク伝熱評価法の確立および伝熱性能の改善を目指して検討を行った。

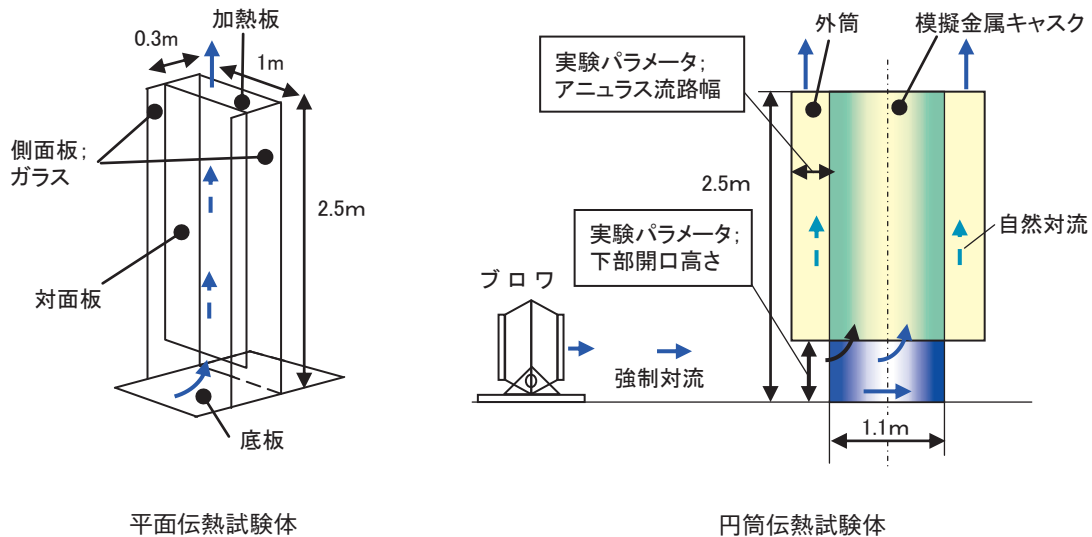


図6-2-5 基本伝熱試験体

金属キャスクの許認可では、汎用の熱伝達率を用いて表面温度が評価されてきた。この伝熱評価法は信頼性が高く、3次元熱流動解析の検証などにも適用されている。しかし、汎用熱伝達率の式では単純化された理論や境界条件が前提となっているため、実際の伝熱場では過度に安全側の結果となる場合があった。特に、キャスク伝熱は周囲の影響を受けやすいことから、熱伝達率の適用性に対し十分な検討が必要となる。ここでは、さまざまな境界条件の下で模擬伝熱試験を行い、その試験結果によく合う合理的な伝熱式を探した。また、キャスク発熱量の増大に備えて、キャスク伝熱性能の改善策を検討した。

(1) 伝熱評価

キャスクやキャニスタを、基本的な伝熱体系である平面体系および円筒体系により模擬し(図6-2-5)、その伝熱状況を詳細に評価した。なお、円筒体系は、実機金属キャスクのほぼ1/2縮尺に相当する。試験では、伝熱に関わる境界条件(表面の熱流束、流路仕切りの有無、クロスフローの強さなど)が伝熱に及ぼす影響を評価した。

円筒試験では、上流側である円筒下部の伝熱面においてすでに空気温度が変動しており、明確な層流状態は見出せなかった。伝熱開始点近傍においてすら室内流に含まれる乱れや温度変動に影響され、熱伝達率は乱流下の値に漸近していた。

貯蔵室の風量が少ないと高温空気がスムーズに外部へ

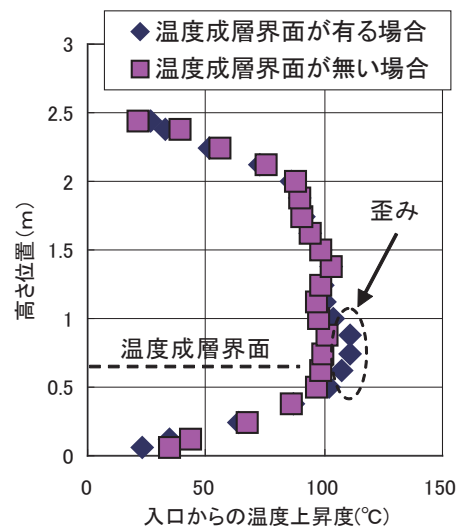
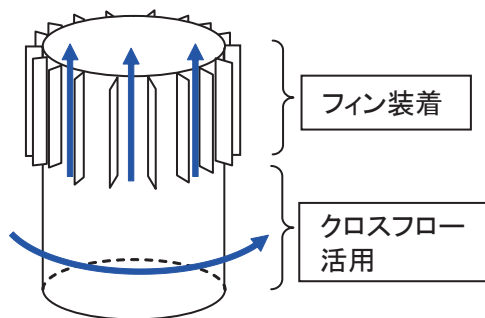


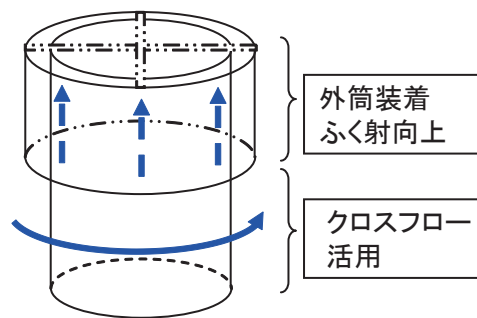
図6-2-6 温度成層界面により発生した伝熱面温度の歪み

排出されず停滞し、温度成層界面が形成される。伝熱面を上昇する対流がこの成層界面を横切る時には、浮力による制動が働き、伝熱面温度がやや高くなった(図6-2-6)。実際のキャスク貯蔵施設でもキャスク表面の熱伝達は室内の温度成層化に影響されると予想され、排気の促進が重要であることが再認識された。

伝熱面温度分布の詳細な計測結果に基づき、熱伝達率分布を評価した。円筒容器単体の自然対流熱伝達に関しては、MIYAMOTO式<sup>3)</sup>が試験結果に最もよく一致し



フィン装着による伝熱促進のアイデア



ふう射向上による伝熱促進のアイデア

図6-2-7 除熱性能改善の提案

表6-2-1 キャスク除熱設計の推奨熱伝達率

熱伝達率評価	推奨式
自然対流熱伝達	MIYAMOTOの式
自然対流＋クロスフローの熱伝達	MIYAMOTOの式と円柱周りのクロスフローの式の線形和
フィン部分の熱伝達	(MIYAMOTOの式)をベースとし、フィン効率を考慮

た。乱流域では、甲藤の式<sup>4)</sup>などもよく合った。貯蔵施設では、キャスク表面を上昇する流れとキャスクを横切るクロスフローの共存対流により冷却がなされることが多い。この流れでは、前述の自然対流熱伝達率とクロスフロー熱伝達率の線形和が、試験結果の熱伝達率に近いことが分かった。浮力上昇流は、キャスク表面近傍のミクロな流れであるが、一方のクロスフローは、キャスク全体を包むマクロな流れであり、両者のスケールは大きく異なる。また、両者の流れは互いに直交する。これらの理由により、両流れは干渉が少なく独立的になると考えられ、両熱伝達率の和が試験結果によく合うに至ったと推定される。表6-2-1に評価のまとめを示す。

## (2) 除熱特性の改善

キャスクやキャニスタ表面の伝熱流動には、表面熱伝達率が小さいという特徴がある。このような伝熱の性能改善には、まず、トータルの伝熱面積を増やすことが考えられる。熱伝達率が大きくなるように自然対流を促進し、風速を上げることも有効である。さらに、熱伝達以外に輻射伝熱を活用することも考えられる。伝熱面にフィンを付けると、評価ケースでは伝熱面の温度が最大

で25%下がった。一方、伝熱面と対面板の両面を黒色塗装することにより、ふう射伝熱が促進されると同時にスタック効果が寄与して、伝熱面の温度が20%下がった。これらの除熱性能改善策を導入した金属キャスクのアイデアを、図6-2-7のように提案する。

## 参考文献

### 6-1

- 1) 南波宏介、白井孝治、三枝利有：航空機衝突時の使用済燃料貯蔵施設の耐衝撃性評価－衝撃荷重を受ける金属キャスクの密封性能に関する数値解析の評価－、電力中央研究所研究報告 N07040、2008年6月。
- 2) 南波宏介、白井孝治、三枝利有：航空機衝突時の使用済燃料貯蔵施設の耐衝撃性評価（その2）－縮尺金属キャスクを用いた高速飛来物水平衝突試験－、電力中央研究所研究報告 N08079、2009年5月。
- 3) 竹田浩文他：金属キャスク落下時瞬時漏えい評価－実物大金属キャスク落下試験－、電力中央研究所研究報告 N06004、2006年12月。
- 4) 影山典弘他：金属キャスク落下時瞬時漏えい評価－取扱い中の事故事象に対する数値解析による密封性能評価－、電力中央研究所研究報告 N06005、2006年12月。
- 5) 電力中央研究所：平成21年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等（中間貯蔵設備等長期健全性等試験）報告書、2010年3月。

### 6-2

- 1) 竹田浩文：金属キャスク貯蔵施設の除熱模型試験方法の提案、電力中央研究所研究報告 N06032、2007年5月。
- 2) 古賀智成：使用済燃料貯蔵キャスクの伝熱流動評価ならびに除熱性能の向上、電力中央研究所研究報告 U03042、2004年3月。
- 3) Miyamoto, M., et al.: Development of turbulence characteristics in a vertical free convection boundary layer, Proc. 7th Int. Heat Trans. Conf., pp.323-328, 1982.
- 4) 甲藤好郎：伝熱概論、養賢堂、1981年。