

第 9 章

9

**輸送・貯蔵技術に関する基礎的
研究および将来技術**

第9章 輸送・貯蔵技術に関する基礎的研究および将来技術 目次

我孫子研究所構造部 上席研究員 小崎 明郎
 我孫子研究所構造部 上席研究員 渡部 直人
 我孫子研究所水理部 主任研究員 亘 真澄
 我孫子研究所構造部 上席研究員 伊藤 千浩
 我孫子研究所構造部 主任研究員 白井 孝治
 我孫子研究所リサイクル燃料貯蔵技術課題推進担当 三枝 利有

9 - 1 金属材料構造物の腐食寿命評価技術95
 9 - 2 輸送の確率論的安全評価96
 9 - 3 廃熱・放射線等利用技術97
 9 - 4 劣化ウランコンクリート技術99
 9 - 5 輸送・貯蔵兼用キャスクの実用化100
 9 - 6 コンクリートモジュール貯蔵技術確証試験100

小崎 明郎 (82ページに掲載)



渡部 直人 (1980年入所)
 当初はバックエンド関連のセメント固化体の各種試験ならびに、コンクリート構造物の耐久性に関する研究を手がける。その後、発電所廃棄物埋設用コンクリートピットの透水性研究を経て、放射性物質輸送のリスク評価研究(輸送のPSA)に従事している。最近は、ヴァーチャルリアリティ技術を活用した輸送の支援システムの研究にも着手した。

亘 真澄 (72ページに掲載)

伊藤 千浩 (8ページに掲載)

白井 孝治 (72ページに掲載)

三枝 利有 (8ページに掲載)

9 - 1 金属材料構造物の腐食寿命評価技術^{(1)~(4)}

放射性廃棄物等の輸送・貯蔵・処分の各分野では、材料・構造等の長期的な信頼性確保が日増しに重要となり、腐食に対する精度の高い健全性評価が必要となってきた。このため、当所ではバックエンド分野を対象に金属材料の腐食寿命評価技術に関する基礎的研究を実施し、得られた成果や蓄積された試験技術を実機に対する試験・評価等に応用している。以下にその概略を紹介する。

(1) すきま腐食に関する基礎的研究

腐食評価に際しては、対象とする金属材料が使用環境で腐食を起こし得るのか、あるいは腐食しないのか、また、腐食する場合にはどういった腐食形態(全面腐食、局部腐食(孔食、すきま腐食、応力腐食割れ等))になるのかをまず明らかにする必要がある。

このため、当所では、電気化学的試験により炭素鋼と耐食合金(ステンレス鋼、ニッケル基合金、チタン合金等)について、腐食領域図を作成した。局部腐食の中でも最も安全側の厳しい評価を与えるすきま腐食に関する例を図9-1-1に示す。

図中の境界線よりも下側の領域がすきま腐食を起こさない領域であることを示す。本結果は、平衡論的な手法で得られた結果で、時間とは無関係なことから、同図を用いて使用環境に応じた適切な材料選定を行うことにより、長期間の健全性を確保しうると考えられる。

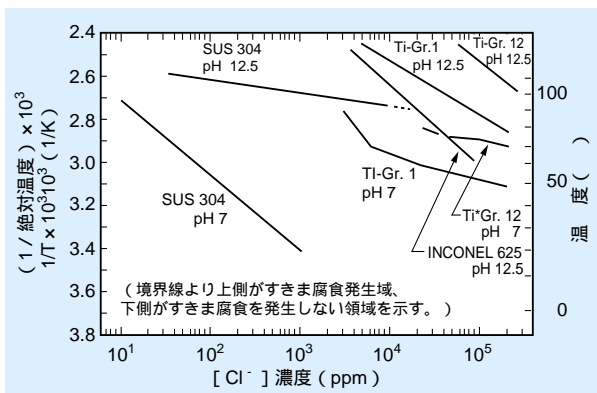


図9-1-1 耐食合金のすきま腐食領域図の例

一方、実際の金属材料の腐食寿命評価においては、すきま腐食が発生した場合にどれだけの余寿命が期待できるかを推定できるようにしておくことも重要であることから、速度論的なすきま腐食寿命評価手法についても研究を進めている。

(2) MOX新燃料被覆管材料の海中腐食

MOX新燃料輸送物が万が一の海没事故に遭遇し、輸送容器が破損あるいは腐食して容器内部に海水が流入した場合に、燃料被覆管が海中で閉じ込め性能(腐食の観点から)を保持できるのか否かについてこれまで明らかになっていなかった。

このため、MOX新燃料被覆管材料(Zr^{-2} および Zr^{-4})を対象に、局部腐食の中で最も厳しい評価を与えるすきま腐食に関する電気化学試験を行い、海水中で被覆管材料が腐食しない温度条件を平衡論的に明らかにした。

その結果、 Zr^{-4} では海水に近い3.5% Cl⁻水溶液で約145 ~ 150 で、 Zr^{-2} では10% Cl⁻水溶液で165 で、すきま腐食が停止した。

一方、実際のMOX新燃料被覆管の海没時の温度(海水が被覆管に接触した時の温度)は約100以下と考えられるため、海没してもすきま腐食を起こす心配がないことが明らかとなった。

(3) 輸送容器の海中腐食⁽³⁾

万が一輸送物が海没すると、いずれ腐食により容器本体と蓋とのすきまを介して核種が外に漏れ出すことも考えられるが、これまで容器の腐食挙動や容器本体と蓋とのすきま間隔に腐食がどう影響するか等の実データがほとんどなかった。このため、被ばく線量評価で用いる輸送容器のバリア効果^{注1)}に及ぼす腐食の影響を調べた。

海中に浸漬暴露(最大約1年間)させた輸送容器の密

注1) : 海没した輸送容器から核種が外に漏れ出す量が容器本体と蓋とのすきま間隔に依存し、すきま間隔が小さい程流出量が抑えられる効果を容器のバリア効果という。容器のすきま間隔は腐食前で10 μmと設定し、海没後もこの値が保持されるとこれまで仮定していたが、腐食前後ともに実データによる裏付けがなかった。

封部を模擬した小モデル試験体(縮尺1/5)を定期的に引上げて密封性能を調べる(図9-1-2)とともに、切断・解体して腐食量を実測した。その結果、①約1年間はゴムガスケットによって密封性が保持されること、②容器本体と蓋とのすきま間隔は約1年間の浸漬後においても1~3 μ mの小さな値を示し、仮にゴムガスケットが劣化して密封機能を失っても、環境影響評価での設定値10 μ mを余裕を持って確保できることが明らかとなった。

(4) 使用済燃料貯蔵容器の貯蔵中における海塩粒子腐食⁽⁴⁾

使用済燃料貯蔵容器が長期間の貯蔵中に潮風(海塩粒子)により腐食し、密封性能にどう影響するかを調べるために容器密封部の1/5縮尺モデル試験体や、実機と同じガスケット材料を挟み込んだすきま腐食試験片によ

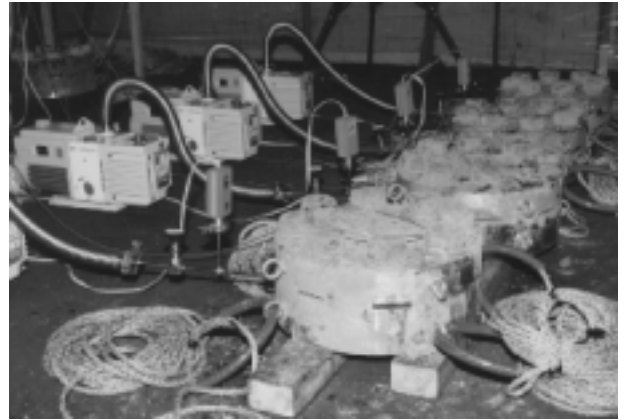


図9-1-2 海中浸漬後の密封性能測定状況

る潮風環境加速試験ならびに自然環境暴露試験を行い、金属製貯蔵容器は貯蔵期間40年に対して十分裕度を持って密封健全性を確保できることを明らかにした。

9 - 2 輸送の確率論的安全評価

放射性物質輸送の安全性を評価するために、IAEA輸送規則に基づく数多くの試験あるいは解析が実施されており、これらは「決定論的安全評価」と呼ばれている。これに対して、原子力発電所などを対象に、想定される事故シナリオを論理的に分析し、その発生確率を求める「確率論的安全評価(PSA)」が実施されており、放射性物質輸送でも各国でPSAが試みられている。

当所では、我が国における放射性物質輸送のPSAを確立するために、体系的な手法を構築するとともに、現実の輸送を対象とするケーススタディにより、同手法の適用性を検討してきた⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。また、PSAの中の一つの方法論として、輸送に伴うリスク(被ばく線量と確率の積)を直接求める計算コード(例えばINTERTRAN2)が開発されており、今後規制への取り込みが議論されている。

当所では、我が国の放射性物質輸送に適用可能なPSA手法を確立するとともに、輸送のリスクを計算するINTERTRAN2コードの適用をはかる事を目的に下記の研究成果を得ている。

(1) 事故シナリオ分析手法の構築

事故進展を分析するためのイベントツリー手法と事故原因を分析するためのフォールトツリー手法を組み合わせることにより、輸送の事故を分析する手法を構築した。

(2) リスクカーブの検討

輸送の安全性に関する指標の一例として、リスクカーブの作成方法を確立し、トンネル火災時の輸送物への入熱量に関するリスクカーブを作成した(図9-2-1)。

(3) INTERTRAN2の適用性研究

IAEAの国際共同研究の中で開発されているINTERTRAN2コードについて、発電所廃棄物コンテナの輸送を対象としてケーススタディを実施し、同コードが適用可能であることを確認した。

(4) 輸送リスクのゆらぎ評価方法の提案

INTERTRAN2などのリスク評価コードは、現実には入力変数の変動(「ゆらぎ」と称す)にともない、出力としての被ばくリスクも分布を有する。そこで、統計データより確率分布を作成し、Monte Carlo法に替わる効

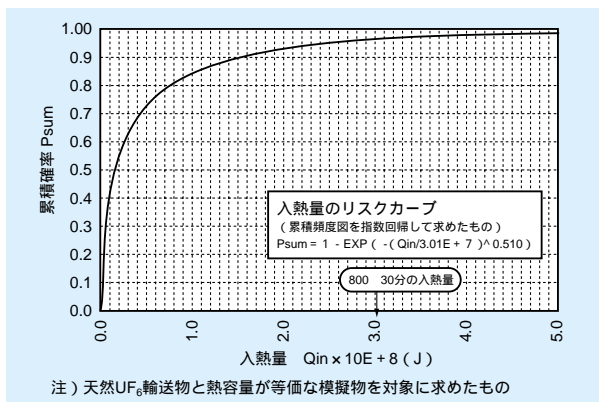


図9-2-1 トンネル火災のリスクカーブ(例)

率的なサンプリング技法(Latin Hypercube Sampling)を用いることにより、被ばくリスクを求める手法を提案した。さらに、現実の新燃料輸送を対象とするケーススタディを実施し、被ばくリスクの分布を求めた(図9-2-2)。

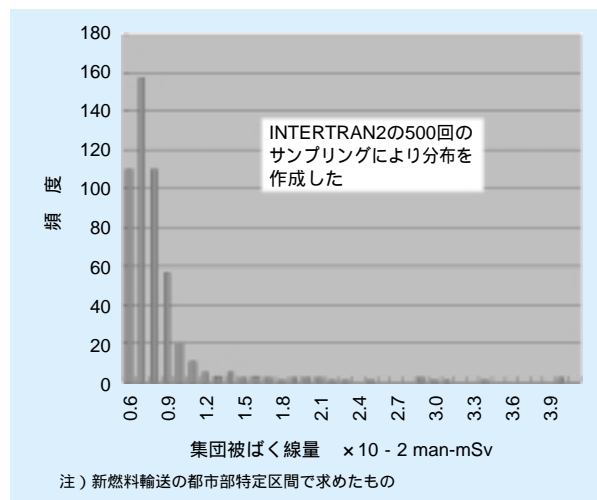


図9-2-2 INTERTRAN2入力変数のゆらぎに伴う被ばく線量分布

9 - 3 廃熱・放射線等利用技術

貯蔵中の使用済燃料からは、長期間に亘って熱と放射線が放出される。これまで、これらのエネルギーを利用する貯蔵施設概念はなかったが、エネルギーの有効利用の観点から、使用済燃料の熱・放射線を利用するシステムについてフィージビリティスタディを行った。

検討対象とする貯蔵方式は、敷地外の大容量貯蔵を想定して乾式貯蔵施設(自然循環型)とした。また、乾式貯蔵施設にはいくつかの方式があるが、本検討では、廃熱や放射線利用のし易さを考慮してポルト貯蔵方式を対象とした。

9-3-1 廃熱利用技術

使用済燃料乾式貯蔵施設で廃熱回収を行う場合、使用済燃料を収納した容器を冷却した空気から熱エネルギーを回収する方法が安全かつ効率的である。貯蔵部は77本の収納管(一つの収納管内に4体のPWR使用済燃料集合体を収納した貯蔵容器が一つ収納されている)

が一つの貯蔵区画を形成しており、除熱機能は各区画毎に担保される(1区画の発熱量は306kW)。貯蔵施設には、廃熱回収を行うための熱交換器が煙突部に取り付けられており、熱交換器内で昇温された水はそのまま利用先に送られるか、あるいはヒートポンプによってさらに昇温され利用先に送られる(本検討では利用先は特定しないものとする)。このようなシステムに対し、冷却空気温度および燃料被覆管最高温度を計算し、除熱性能上問題がないことを確認した。

ポルト貯蔵施設の冷却空気流量は、使用済燃料からの発熱により暖められた空気のドラフト力と冷却空気流路の圧力損失のバランスから求まる。この場合、熱交換器の温度効率を設定し、熱交換器の循環水側の入口温度10℃、出口温度15℃として、施設内を流れる冷却空気の流量および温度を求めた。さらに、この冷却空気温度を境界条件として、収納管内の温度を半径方向二次元断面の熱伝導解析によって求め、燃料被覆管の最高温度を評価した。その結果を表9-3-1に示す。

以上の結果から、使用済燃料被覆管温度等が制限値

表9-3-1 廃熱回収機能付き貯蔵施設の除熱計算結果

項目	計算結果	制限温度
燃料被覆管最高温度	299	約350
貯蔵部入口空気温度	26.2	-
貯蔵部出口空気温度	39.2	65
冷却空気流量	23.5kg/s	-

以下となっており、本来貯蔵施設が持つ除熱安全性を損なわない廃熱回収システムを構築することが可能であることが明らかとなった⁽⁹⁾。

9-3-2 放射線利用技術

放射線は管理を誤ると人体や環境に悪影響を及ぼすが、安全に管理・運用すれば様々な用途に利用が可能である。産業界では、ガンマ線源 (Co-60等) や電子線による照射利用が数多くなされているが、本検討ではガンマ線源に代わる線源として使用済燃料を収納した容器が使えるかどうかを評価した。

照射を行う方法として、使用済燃料を収納した容器 (一つの容器にPWR使用済燃料集合体1体を収納) をある本数照射専用の場所に移動し、容器の間に被照射物 (被照射物は特定しないものとする) を通すことで照射を行うものとした。その場合の照射場における空気吸収線量率を計算 (QAD-CGGP2コードを使用) により求めた。

文献調査及び照射施設での調査から、照射事業では、照射場における線量率が10kGy/h程度であることが明

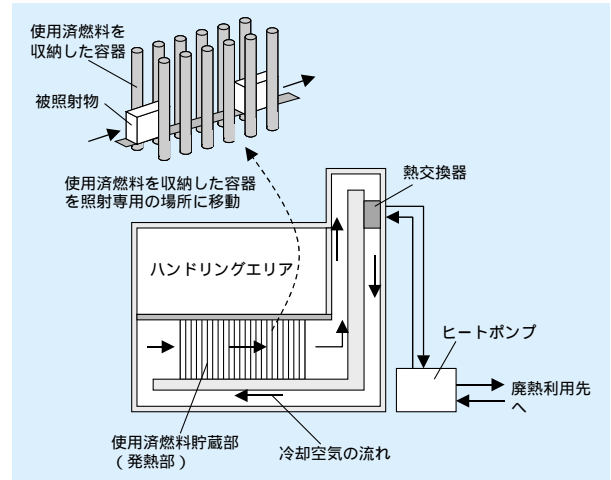


図9-3-1 廃熱放射線利用貯蔵施設概念図

らかとなっている。本検討では、容器の本数をパラメータとして計算を行ったところ、配列を2×7列にすると最大線量率が約11.1kGy/hとなり、照射施設として必要な線量率が得られることがわかった⁽¹⁰⁾。

以上の結果より、廃熱放射線を利用する貯蔵施設 (図9-3-1) が実現可能なことが明らかとなったが、経済性や回収した熱エネルギーの有効な利用方法、事業としての被照射物の選定等を今後さらに検討する必要がある。

9-3-3 金属廃棄物の再利用技術

将来、廃炉に伴い発生する解体放射性金属廃棄物を有効利用する、使用済燃料貯蔵カスクの製造可能性と課題を明らかにした⁽¹¹⁾。

9 - 4 劣化ウランコンクリート技術⁽⁴⁾、⁽¹²⁾、⁽¹³⁾

軽水炉型原子力発電所の燃料としては核分裂性のウラン235が0.7%含まれている天然のウランを3%程度に濃縮したものが用いられている。一方、この濃縮の過程でウラン235の濃度が天然の存在比0.7%より減少した、劣化ウラン(Depleted Uranium)と呼ばれるウランが生成される。この劣化ウランは比重がきわめて大きい(18.7)という特徴を持つ。一般に比重が大きな材料はガンマ線遮へい材として優れているため、使用済燃料貯蔵キャスク等への有効利用が望まれる。

本研究では、ペレット状の劣化ウランを、中性子遮へい材として利用されることの多いコンクリートに骨材の代替物として混入した重量コンクリート〔以下、劣化ウランコンクリート(Depleted Uranium Concrete: DUC)と呼ぶ〕を製作し、圧縮強度試験および遮へい性能試験を実施して、これらの性能を明らかにするとともに技術的な成立性について検討した。

圧縮強度試験結果より、劣化ウランペレットの分布が均一であれば比重が6程度でかつ所要の圧縮強度が得られることがわかった。また、遮へい性能試験の結果、劣化ウランコンクリートは明らかに普通コンクリートに比べて遮へい能力が高く、かつ、見かけ比重に見合う線遮へい性能を有していることを確認した。これらの結果より劣化ウランコンクリートが構造材および高性能の遮へい材として技術的に成立する見通しを得た。さらに、試験に対して劣化ウランペレットを均一のモデル化し、遮へい解析コードDOT3.5を用いて遮へい解析を行い、解析手法の適用性を確認した。

また、実構造物の製作を考えた場合、ワーカビリティを確保しつつ劣化ウランペレット分布の均一性を確保するため流動性のある程度抑えなければならない。ここでは、小型ブロック状のものを製作し劣化ウランペレットの分布状態を観察した。その結果、材料の均

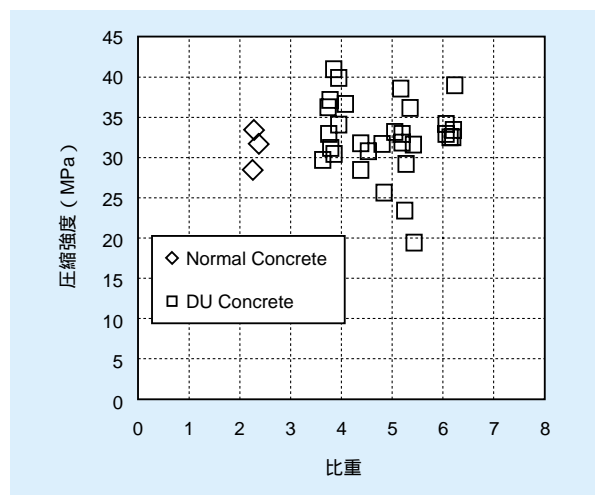


図9-4-1 劣化ウランコンクリートの強度特性

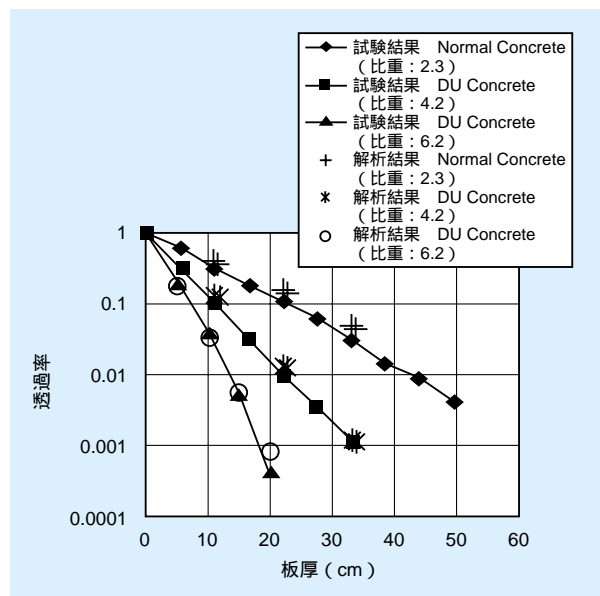


図9-4-2 劣化ウランコンクリートの遮へい性能

一性を実現するためには、施工方法に何らかの工夫が必要であることが示唆された。

9 - 5 輸送・貯蔵兼用キャスクの実用化

使用済燃料貯蔵に関する今後の課題として輸送・貯蔵兼用キャスクの実用化がある。輸送・兼用キャスクとは、同一のキャスクで、使用済燃料の輸送(発電所から貯蔵施設、貯蔵施設から再処理施設)と貯蔵の要件を満たす機能を持つキャスクのことをいう。さらに、一般的には、貯蔵後、蓋を開放すること無しに、輸送に供することのできるキャスクのことをいう。このようなキャスクのメリットとしては、輸送と貯蔵に同一のキャスクを用いることで、コスト低減を図れること、および蓋の開放作業がなくなることで、作業従事者の被ばく線量を低減できることにある。

わが国では、すでに輸送キャスクおよび貯蔵キャス

クについては実用化され実績があるが、この兼用キャスクを我が国で実用化するためには、技術的な観点から、貯蔵終了後にキャスクや燃料が輸送可能な状態すなわち輸送キャスクに関する要件が満たされていることを明らかにする必要がある。例えば、貯蔵期間中にキャスクの構成部材の、使用済燃料からの発熱や放射線による経年劣化を評価する必要がある。

これまでに得られた知見によれば、貯蔵期間中に想定される環境条件では、材料の劣化はほとんどないという結果が得られているが、更なるデータの蓄積が必要である。

9 - 6 コンクリートモジュール貯蔵技術確証試験^{(14) ~ (25)}

平成10年6月の通商産業省総合エネルギー調査会原子力部会中間報告において、使用済燃料がリサイクル燃料資源と位置づけられ、この資源を有効に利用できるように再処理を行うまで中間的に貯蔵することとし、2010年までに発電所敷地外貯蔵施設を実用化することが示されてから急速に実用化に向けての気運が高まってきた。

現在では、金属キャスク貯蔵が実用化段階を迎えつつあるが、使用済燃料の貯蔵の緊急性を考慮すると、経済的な観点からコンクリートモジュール貯蔵の実用化を図る必要がある。海外では、既にコンクリートモジュール貯蔵が認可され、運転中である(図9-6-1は、米国で運転中のコンクリートモジュール貯蔵施設の例)。

コンクリートモジュール貯蔵施設は、原子力発電所から取り出された使用済燃料をキャニスタと呼ばれる金属製の輸送・貯蔵兼用の密封容器に収納し、鉄筋コンクリート構造物で貯蔵する方式であり、コンクリートキャスク、横型コンクリートサイロ、コンクリートボルトの3形式に大別される。



(コンクリートキャスク貯蔵施設：ANO発電所)



(横型コンクリートサイロ貯蔵施設：Ocone発電所)

図9-6-1 米国で運転中のコンクリートモジュール貯蔵施設

コンクリートモジュール貯蔵方式は、

- ・鉄筋コンクリートを適用したモジュール構成であるため、材料単価が安価で初期投資が小さく、金属キャスクと同様に必要に応じて貯蔵容量を拡張できる。
- ・自然空冷方式であるため、保守が容易である。
- ・輸送・貯蔵兼用のキャスクの採用により、輸送キャスクが繰り返し使用できる。

等の特徴を有しており、経済的な貯蔵対策として期待されている。

図9-6-2に、キャスクの概要を示す。キャスクの形状は、外径が約1.7m、長さが約4.9m、重量が約15-19トン、溶接で2重蓋を取り付けた構造であり、内部を不活性状態に保持するためヘリウムガスを封入する。

図9-6-3に、コンクリートキャスクの概要図を示す。キャスク下部に設けた開口部から冷却空気を取り入れ、キャスク周囲での冷却空気の自然対流効果により、キャスク内で発生する使用済燃料の崩壊熱を除去する方式である。コンクリートキャスクの形状は、外径が約3.5m、高さが約5.8m、重量が約120トンである。

当所では、このような状況の中、敷地外貯蔵施設の実用化の推進に資するため、経済的なコンクリートモジュール貯蔵技術の実用化研究を推進中であり^{(14)~(23)}、更なる合理化を含め長期貯蔵中の健全性について確認し、使用済燃料の中間貯蔵に関するコンクリートモジュール貯蔵技術の確立及び原子燃料サイクルの円滑な推進に貢献する構想である。

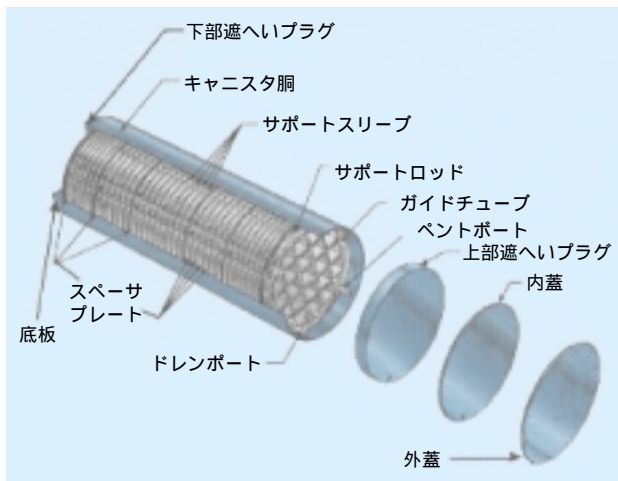


図9-6-2 輸送・貯蔵兼用キャスクの概要

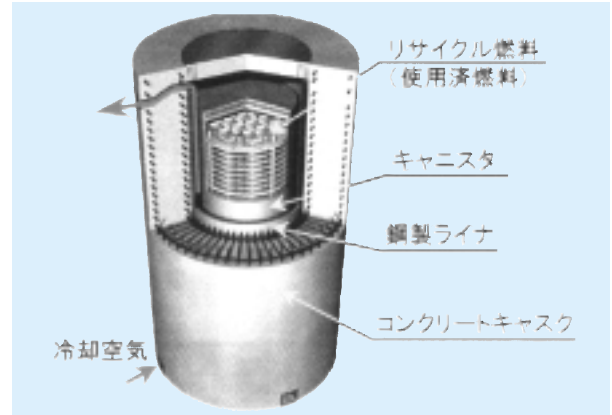


図9-6-3 コンクリートキャスクの概念図

米国等と異なり、わが国は海岸での潮風環境下でのコンクリートキャスクの耐久性評価や、コンクリート等の温度制限上、高精度な除熱設計評価手法等が必要とされる。

図9-6-4に、コンクリートモジュール貯蔵技術確証試験の全体研究概略フローを示す。コンクリートモジュール貯蔵施設のコンクリート構造物や金属キャスクの構造強度部材については、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境、並びにその環境下での経年変化に対して信頼性のある材料を選定し、その必要とされる強度・性能を維持し、必要な安全機能(密封性能、未臨界性、遮へい性能等)を失うことのないように設計する必要がある。また、長期にわたる貯蔵期間中の使用済燃料被覆管の健全性や貯蔵終了後の輸送の安全性に対する評価手法の確立も望まれている。

当所では、コンクリートキャスク等のコンクリートモジュール貯蔵技術について、

- ① キャスク等の金属容器・構造材の健全性評価、
- ② キャスクに収納されている使用済燃料や被覆管等の燃料健全性評価
- ③ キャスクを包蔵するコンクリート容器・構造材の健全性評価

を実規模または縮尺モデルを用いた確証試験を実施している。さらに、これらモジュールを集合させた貯蔵システムについての検討・評価も併せて実施することにより、わが国に適したコンクリートモジュール貯蔵技術の確立を図っていく。

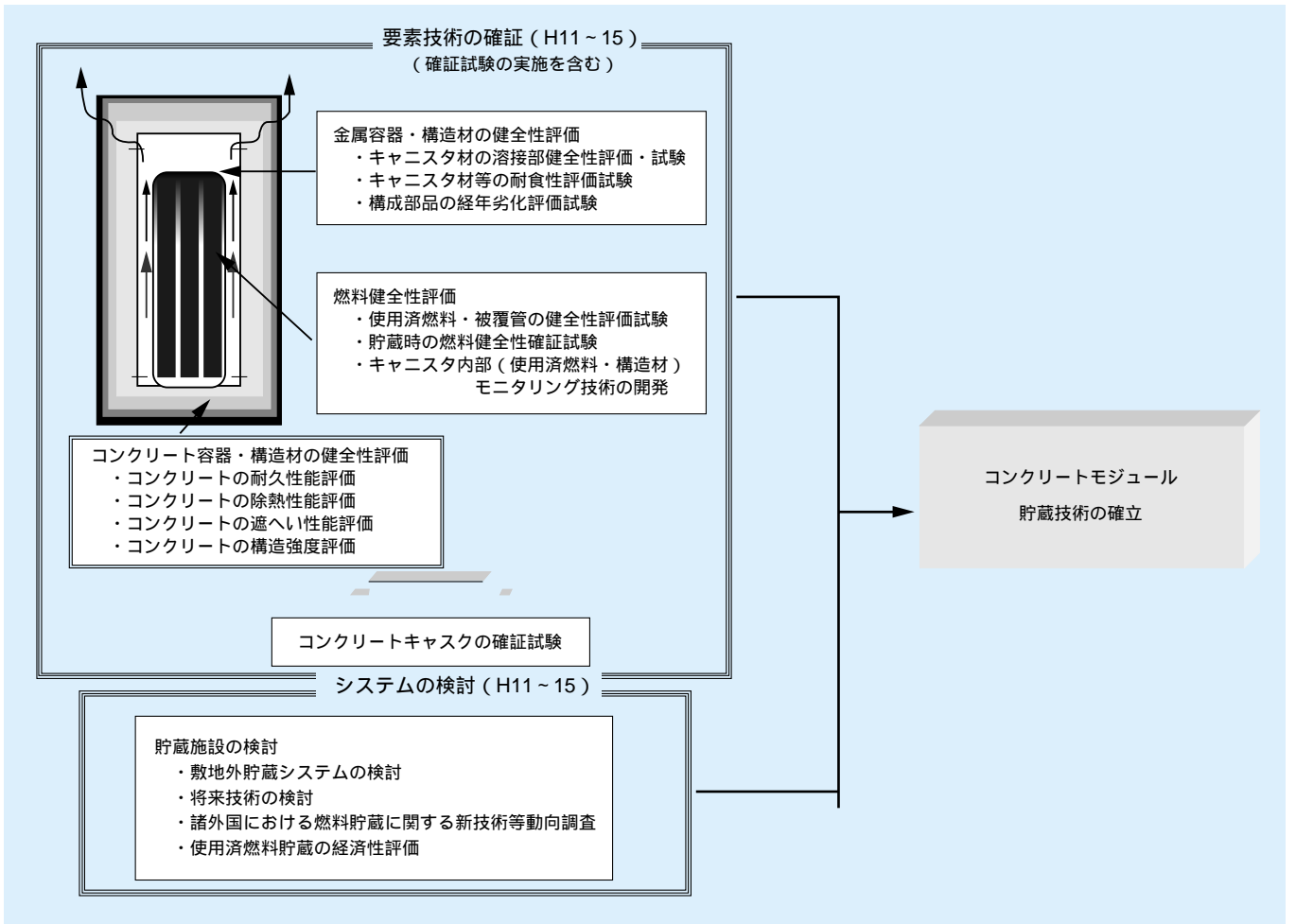


図9-6-4 コンクリートモジュール貯蔵技術確証試験の全体研究概略フロー