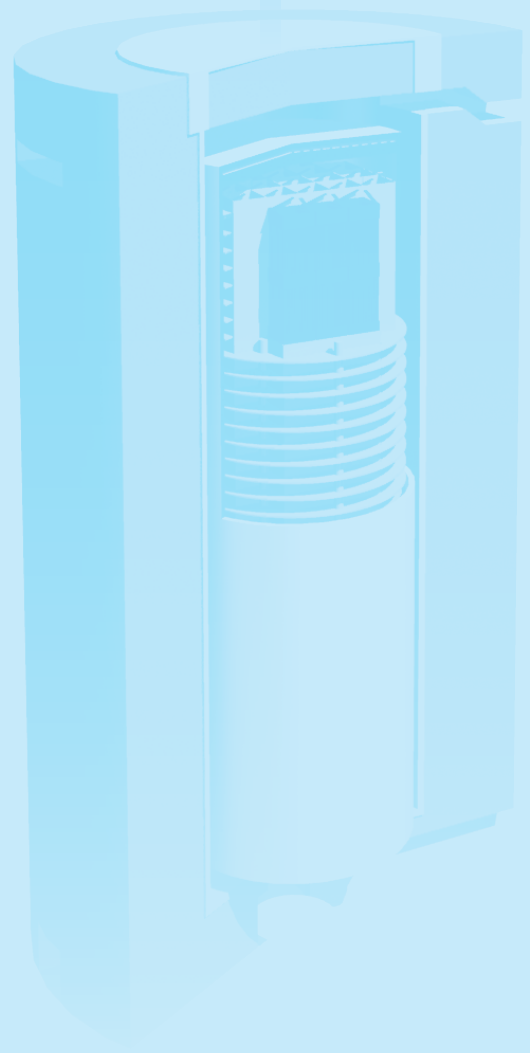


## 第7章

# コンクリートキャスク 貯蔵技術



7-1	キャニスタの応力腐食割れ（SCC）に対する 評価および対策 .....	108
7-1-1	SCC に対する長期健全性評価	
7-1-2	SCC 対策に資する気中塩分量評価	
7-1-3	SCC 対策に資する塩分流入低減装置の開発	
7-2	耐震評価 .....	115
7-2-1	実物大コンクリートキャスク耐震試験	
7-2-2	地震時安定性評価手法の提案	
7-3	遮へい評価 .....	116
7-3-1	キャニスタ表面目視	
7-3-2	キャスク表面状態の経年変化	
7-3-3	遮へい性能	

## 7-1 キャニスタの応力腐食割れ (SCC) に対する評価および対策

### 7-1-1 SCC に対する長期健全性評価

乾式貯蔵の一種であるコンクリートキャスクは、図 7-1-1 に示すように、遮へいを担保するコンクリート製貯蔵容器の内部に、キャニスタを収納した構造となっている。使用済燃料はキャニスタ内に密封され、燃料の崩壊熱はキャニスタ表面を介して除去される。コンクリート製貯蔵容器の上下には空気の流通口が設けられており、キャニスタと貯蔵容器のすき間を外気が自然対流する構造となっている。

我が国においては、中間貯蔵施設の立地は海岸近くになる可能性が高いため、冷却空気中に海塩粒子が多く含まれることとなり、建屋側で塩分流入対策を施さない場合は、キャニスタ表面に海塩粒子が付着する恐れがある。キャニスタの構造や使用環境と類似した化学プラントにおける事例を参照すると、応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking ; SCC) による密封機能の喪失が懸念される (図 7-1-2)。

SCC は図 7-1-3 に示すように、3つの因子が重畳したときに発生する。コンクリートキャスクのキャニスタでは、材料にオーステナイト系ステンレス鋼を用いること、溶接による残留応力が存在すること、海塩粒子が付着する可能性があることが3つの因子として想定されている。よって、これらの因子のうち1つでも取り除くことがで

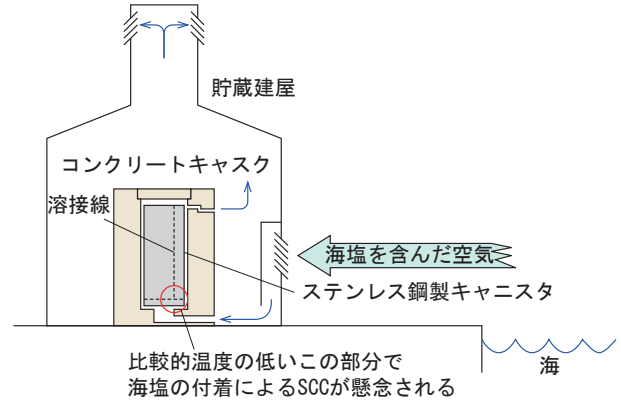


図7-1-2 貯蔵建屋で想定される立地とコンクリートキャスクで懸念されているSCC

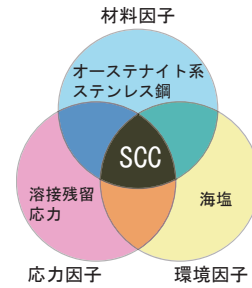


図7-1-3 SCCの3つの因子

ければ、SCCを防ぐことが可能である。表 7-1-1 に、SCC 対策について、SCC の3つの因子から着目した場合の方式選定のオプションを比較して示す。既往の研究において、高耐食性材料を用いたキャニスタの SCC 対策の有効性<sup>1), 2)</sup>が報告されている。米国での貯蔵実績、国際的な経済性や標準化の必要性を勘案し、SUS304L 製キャニスタの SCC 対策評価の成立性について研究の現状をとりまとめた。

#### (1) キャニスタ SCC 対策シナリオ<sup>3)</sup>

図 7-1-4 に、評価ケース 1 に対する SUS304L 製キャニスタ SCC 対策シナリオの例を示す。貯蔵期間中にキャニスタ表面塩分濃度が SCC 発生限界濃度を越えることがなく、更に、万一 SCC が発生したとしてもき裂進展を管理することにより密封機能を維持できるとするシナリオである。以下では、SUS304L 材を対象として、SCC 発生限界塩分濃度試験や 4 点曲げ試験によるき裂進展試験結果に基づき、これらシナリオの成立性を評価した結果について紹介する。SUS304L 材に対するシナリオの成立性が確認できれば、SUS304L 材に比べ耐

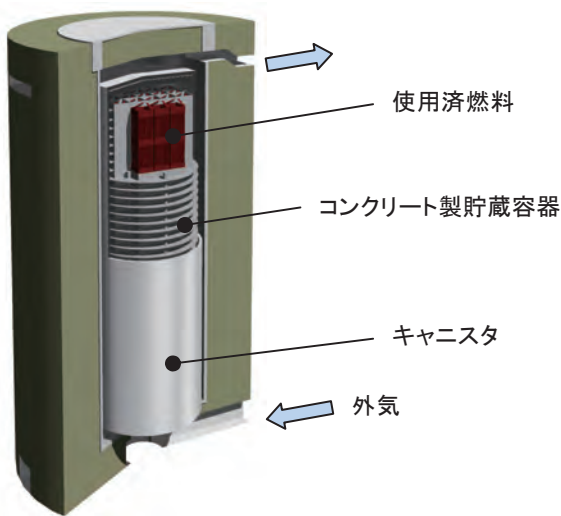


図7-1-1 コンクリートキャスクの構造

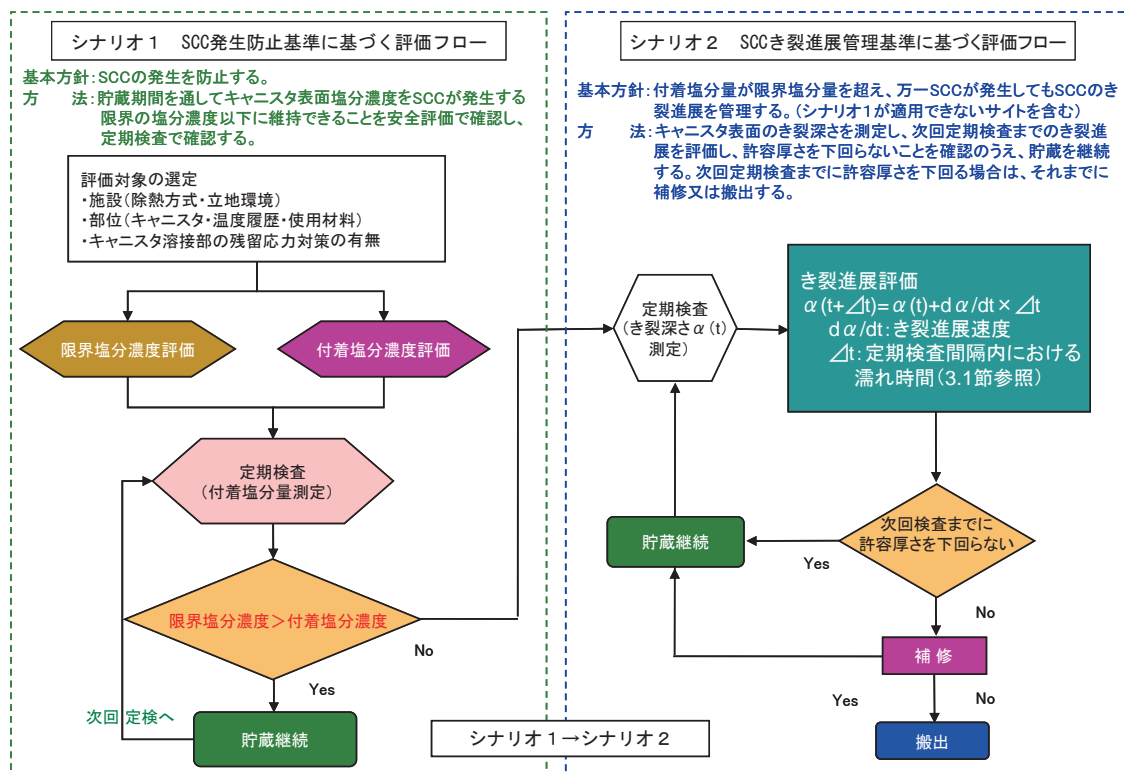


図7-1-4 キャニスタSCC対策シナリオの例

表 7-1-1 SCC の3つの因子から着目した場合の方式選定のオプション

オプション	材 料	応 力	環 境	貯蔵コスト <sup>注1</sup>
評価ケース1 米国で実用化している方式	従来材 (SUS304L, SUS316L等)	対策せず	表面塩分濃度管理 or き裂進展管理 (図 7-1-4 参照)	小
評価ケース2		残留応力低減対策 ・ピーニング <sup>注2</sup>		中
評価ケース3	高耐食性 材料 (SUS329J4L, YUS270等)	・バーニング <sup>注3</sup> ・レーザー / 電子ビーム溶接 <sup>注4</sup>	対策せず	大
評価ケース4		対策せず	表面塩分濃度管理 or き裂進展管理	大

注1: 貯蔵コストは、設備費(キャスクや貯蔵施設等)と運搬費(溶接や輸送等)の合計を示す。  
 注2: 通常のピーニングでは、表面(250~500 $\mu$ m程度)しか応力反転できない可能性が高く、ハンドリング性(キャニスタの表面の保護)に課題が大い。また、溶接方法に応じた自動化システムの開発も必要。  
 注3: アイダホ国立研究所で開発された残留応力対策技術で、Low Plasticity Burnishing(低塑性擦り:以下、LPB)と呼ばれる<sup>4)</sup>。表面から5mm程度まで圧縮応力が導入可能であり、自動化システムも開発済である。  
 注4: 実績のあるSAW(サブマージアーク溶接)やTIG(タングステン・イナート・ガス溶接)に比べ低残留応力が期待できるが、製造方法の成立性やコストの確認が必要。

SCCが高いSUS316L材にも有効なシナリオとなる。加えて、SCC抑制に有効な残留応力対策のSCC発生への影響を評価し、表7-1-1に示した評価ケース2の成立性についても紹介する。

(2) SCC発生防止基準に基づくSUS304Lキャニスタの成立する環境条件  
 相対湿度は温度と絶対湿度(空気中に含まれる水分

量)によって決まり、絶対湿度が一定であれば、温度が高いほど相対湿度は低くなる。国内の気象観測データを参照すると、日本各地の絶対湿度の年間最大値は23~28g/m<sup>3</sup>となっている。絶対湿度30g/m<sup>3</sup>として、SCCの発生が懸念される100℃以下の相対湿度を示したものが図7-1-5である。このように実環境を考慮した場合、80℃以上では相対湿度は10%以下となり、海塩は十分に乾燥していると考えられる。

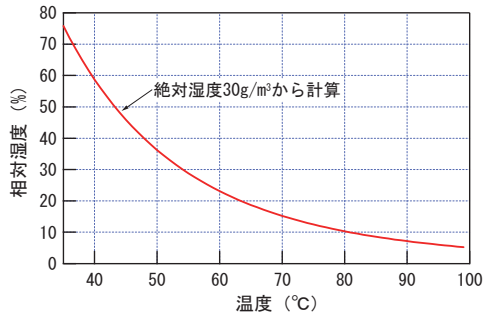


図7-1-5 キャニスタで想定される温度と相対湿度（最大値）の組合せ

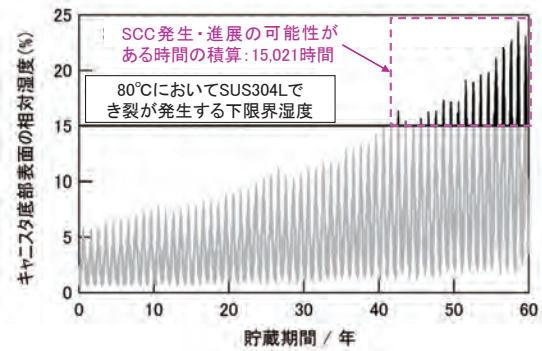


図7-1-7 キャニスタ温度と気象データから求めたSCCが進展する時間

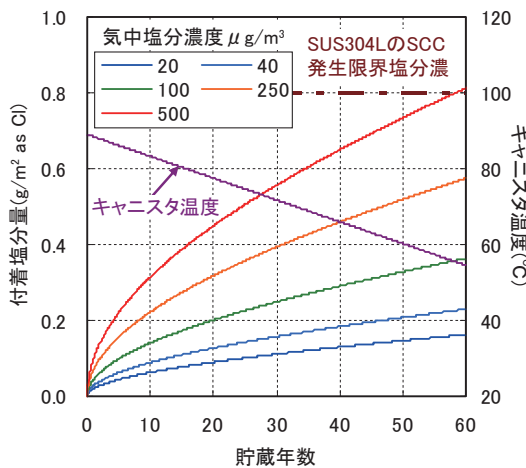


図7-1-6 貯蔵年数とキャニスタ表面に付着する塩分量との関係

上記の温度、湿度条件を踏まえて、実機環境よりも厳しい条件（温度50℃、相対湿度35%）でSUS304L材の定荷重SCC試験による限界塩分濃度試験を実施し、SCC発生限界塩分量として $0.8 \text{ g/m}^2 \text{ as Cl}$ を得た。さらに、気中塩分濃度とキャニスタ表面の付着塩分累積量の相関式<sup>5)</sup>から、気中塩分濃度が $40 \mu\text{g/m}^3$ の場合、貯蔵期間60年での付着塩分累積量はSUS304L材のSCC発生限界塩分濃度 ( $0.8 \text{ g/m}^2 \text{ as Cl}$ ) の約1/4となり、SUS304Lキャニスタを用いたコンクリートキャスク貯蔵の成立性が期待できる（図7-1-6）。

### (3) SCCき裂進展管理基準に基づくSUS304Lキャニスタの腐食寿命

実機環境よりも厳しい条件（温度80℃、相対湿度35%、付着塩分量 $10 \text{ g/m}^2 \text{ as Cl}$ ）におけるSUS304L材の4点曲げ試験より、表面のSCC進展速度 ( $2 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ ) を求めた。この進展速度を用いて、我が国の代表

的な地点での気象データとキャニスタ表面温度の変化を考慮すれば、濡れ時間法<sup>1)</sup>に基づき、貯蔵期間中にSCCが発生・進展する時間を積算でき、この積算時間にき裂進展速度を乗じて得られる進展量と、初期の仮想き裂寸法を加えた値がキャニスタの板厚を下回れば密封機能を維持できる。この濡れ時間法に基づき、貯蔵期間60年にわたるSCC進展深さを算定した例を図7-1-7に示した。SCC進展深さは約4mmとなり、キャニスタの標準的な板厚12.7mm（0.5インチ）を下回る結果となる。

### (4) 残留応力対策のSCC発生への影響

実機相当のキャニスタの施工を考慮した溶接試験体を製作し、試験体溶接部表面に3種類（レーザーショットピーニング：LSP, Low Plasticity Burnishing: LPB<sup>4)</sup>、ジルコニアショットピーニング：ZSP）の溶接残留応力緩和処理を施し、X線回折法による残留応力測定により、図7-1-8に示すように深さ0.6mmまで圧縮応力が付与できることを確認した。

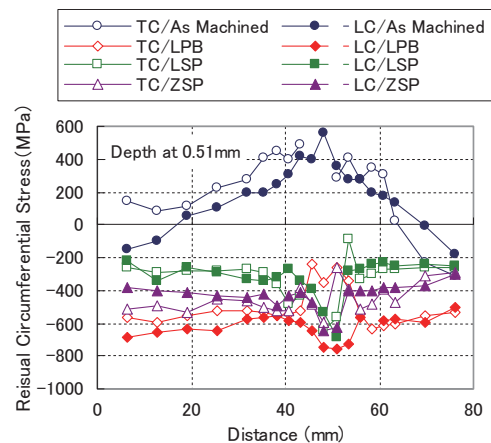
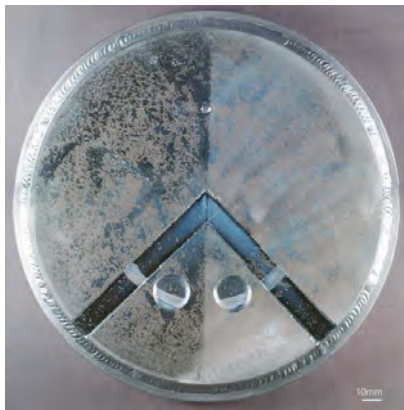


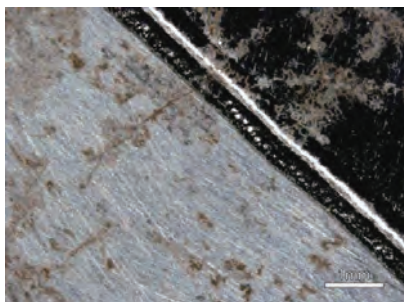
図7-1-8 残留応力の分布

さらに、実機よりも厳しい条件（温度 80℃・相対湿度 35%・付着塩分量 4 g/m<sup>2</sup> as Cl）で 1000 時間以上の SCC 試験を実施した結果、図 7-1-9 に示すように、緩和処理を施さない個所においては溶接線近傍で SCC と推定されるき裂が発生したが、緩和処理を施した個所においてはき裂の発生は認められなかった。これより、いずれの緩和処理も溶接残留応力対策に有効であり、実機へ適用できる見通しを得た。

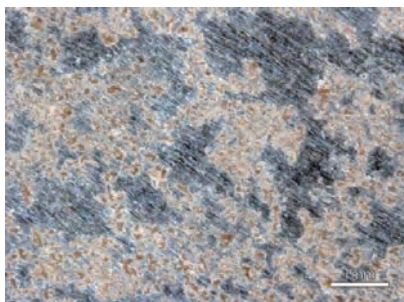
今後は、SUS316L の SCC 評価データを取得すると共に、実物大コンクリートキャスクを用いた経年変化実証試験を行い、上記の SUS304L キャニスタの SCC 対策の有効性を確認する必要がある。



(a) 試験片の表面状態



(b) 未処理の表面でき裂が発生した箇所



(c) LPB 処理を施した面（腐食のみでき裂は無い）

図7-1-9 SCC試験後の表面状態

## 7-1-2 SCC 対策に資する気中塩分量評価<sup>6,7)</sup>

使用済燃料を海岸近くでコンクリートキャスク貯蔵する場合、キャニスタ材の SCC による密封機能評価が必要となる。SCC 評価の一つとして、貯蔵期間中、キャニスタ表面に付着する塩分量の評価が挙げられる。付着塩分量評価を行うためには、貯蔵施設での空気中に含まれる塩分量評価も必要となる。本研究では、付着塩分量評価のため、室内試験および実環境試験を行い、付着塩分量の経時変化データを取得し、風速や試験片温度が付着塩分量に与える影響を明らかにした。しかし、室内試験では、空気中の塩分濃度（以下、気中塩分濃度）の調整が困難で、海岸近くの環境に比べ、10<sup>3</sup> オーダー程度高くなっている。本研究では、気中塩分濃度などが付着量に与える影響を調べるため、海岸から約 4km 内陸に入った地点に試験装置を設置し、付着塩分量の時間変化を計測した。

### (1) 試験装置、試験方法

#### (a) 室内試験

室内試験は、当研究所の我孫子地区で実施した。試験装置は、断面が 40 × 40cm、長さ約 4m の矩形風洞で、上流側に、ブロー、恒温・恒湿槽、整流部があり、一定温度・湿度の空気を風洞内に送ることが可能な構造である（図 7-1-10）。風洞下流部には、75 × 75mm の金属試験片 10 枚が設置可能で、試験片は、風洞内表面に平行に設置する。試験片温度は、ヒータにより制御が可能である。風洞の上流部には、ノズルが取り付けられており、

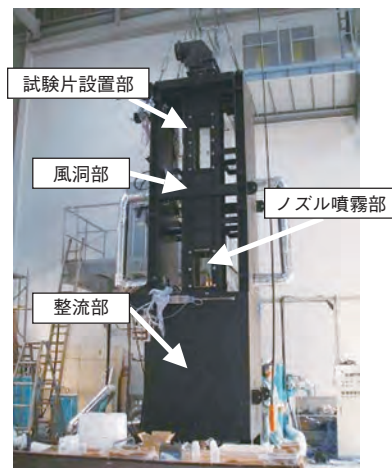


図7-1-10 室内試験装置の外観

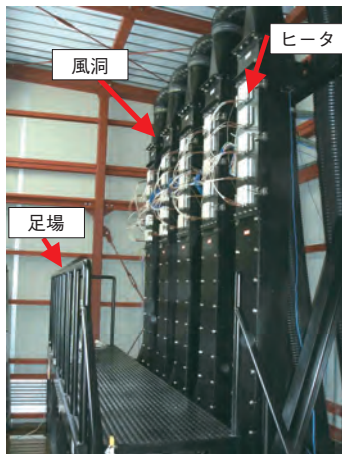
試験中、風洞内に塩水を噴霧する。洗浄した試験片を風洞内に設置し、一定時間、塩水を噴霧した状態で風洞内に空気を送り、試験終了後、試験片を取り出して、表面に付着したNaClをガーゼで拭き取って分析した。風洞は、水平と垂直の両姿勢で試験が可能である。

(b) 実環境試験

実環境試験は、材料腐食の暴露試験の代表的な試験場の一つである、(財)日本ウエザリングテストセンター銚子暴露試験場で実施した(図7-1-11)。試験場は、海岸から約4km内陸に入った地点である。試験装置は、自然換気型の建屋内に、断面20cm×20cm、長さ約2.5mの風洞5体を垂直に設置したものである。屋外から建屋内に流入した空気は、風洞の下部から上向きに流れ、ブロウを介して、屋外に排出される。各風洞の下流部には、75×75mmの金属試験片5枚が設置可能で、試験片は、風洞内表面に平らに設置する。試験片温度は、ヒータにより制御が可能である。試験では、洗浄した試験片を風洞に取り付け、風洞に連結されたブロウを一定流量で運転する。一定期間経過した後、風洞から試験片



(a) 試験建屋



(b) 試験装置

図7-1-11 実環境試験装置の外観

を取り外し、試験片表面に付着した塩分をガーゼで拭き取り、付着した塩分量を測定した。試験片温度は、30℃および100℃で一定とした。

さらに、実環境での気中塩分量を明らかにするため、従来の気中塩分量測定方法であるドライガーゼ法(JIS Z 2138)に加え、エジェクター式気中塩分計での測定も行った。

(2) 試験結果

図7-1-12に、付着塩分量の室内試験および実環境試験結果を示す。横軸は経過時間で、縦軸は試験片に付着したClイオン量を表している。室内試験では、試験パラメータとして、風速(0.3、0.85、1.4m/s)および試験片温度(30、100、200℃)を変化させた。その結果、風速が大きいほど付着量は多くなり、試験片温度が高いほど、付着量が少なくなる傾向を示すことが明らかとなった。この原因は、風速が大きいと空気の乱れが大きくなり、塩分粒子が壁面に衝突する割合が大きくなるためと考えられる。また、試験片温度が高い場合には、①試験片に近づく塩分粒子が蒸発により液滴から固体になりやすく、固体の場合には液滴に比べて付着しにくいこと、②試験片表面に自然対流境界層があり塩分粒子が近づきにくいこと、③温度が高いと拡散係数が大きくなり、空気中の塩分粒子濃度が小さくなること、④試験片に付着した塩分粒子が乾燥状態となり、湿潤状態よりも剥がれやすいことなど、様々な要因の複合効果によるものと考えられる。一方、実環境試験結果では、付着塩分量が非常に少なく、経過時間に対する増加傾向や風速、試験片温度の影響もほとんど見られなかった。これは、試験の実施場所が海岸から4km内陸に入った場所であり、気

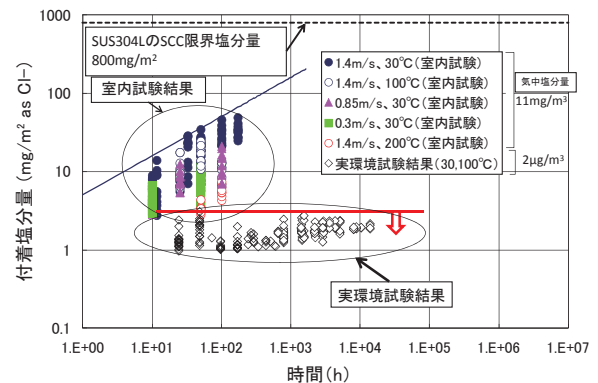


図7-1-12 試験片上への付着塩分量と時間の関係

中塩分量が小さいことが原因と考えられる。室内試験では、噴霧する液滴の大きさを海岸に近い場所で過去に計測されている大きさ（数十 $\mu\text{m}$ ）とほぼ同等とするため、ノズルで強制的に塩水を噴霧している。ノズルの性能から、噴霧量は小さくできないため、室内試験での気中塩分濃度は、実環境試験での値に比べ、 $10^3$ オーダー大きくなっている。従って、室内試験は、気中塩分濃度が高いことにより、実環境試験の加速試験となっている。図7-1-12に示す直線は、室内試験および暴露試験結果の包絡線である。室内試験では時間とともに付着塩分量が増加しているが、実環境試験では付着塩分量の増加はほとんど見られず、約 $3\text{mg}/\text{m}^2$  (as Cl) 以下であった。今後、気中塩分濃度の高い地点での付着塩分量測定が必要である。

気中塩分量のドライガーゼ法による測定では、1ヶ月間、 $10 \times 10\text{cm}$ のガーゼを雨が直接当たらないように屋外に放置し、そのガーゼに付着した塩分量を測定する。この方法は、直接、気中塩分量を測定するものではなく、空気中に含まれる塩分粒子のうち、ガーゼに衝突・付着し、そのまま1ヶ月間落下せずに、残ったものを測定する方法である。この方法はJISで定められた方法で、測定が容易なことから一般的に用いられており、気中塩分環境の比較には、有意義な方法である。2008年4～12月の測定結果（屋外）では、1日当たり $10\text{cm}^2$ のガーゼに付着するNaCl量は、 $0.053 \sim 0.315\text{mg}$ （平均 $0.156\text{mg}$ ）で、この数字は、日本にある暴露試験場の中では、比較的、高い値である。

一方、当研究所が開発したエジェクター式気中塩分計は、外気をガラス容器内にポンプで取り込み、空気中の塩分粒子を容器内の水に溶け込ませるため、取り込んだ空気量と水中の塩分量から気中塩分量が直接測定できる測定器である。しかし、この測定器は、開発途中の機器で、屋外での長時間の測定には不向きであった。実環境試験では、試験建屋内に測定器を置き、初めて長時間の測定を行った。その結果、2008年4月から2009年2月の期間で、測定器2台の1ヶ月平均の値はClイオン量で、 $1.0 \sim 2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。このように、エジェクター式気中塩分計では、ドライガーゼ法では測定できない気中塩分量を測定することができる。

### 7-1-3 SCC対策に資する塩分流入低減装置の開発<sup>9)</sup>

コンクリートキャスク内のキャニスタ溶接部に発生が懸念されるSCCの対策として、溶接残留応力の緩和処理があるが、コンクリートキャスク内部に冷却空気と共に入る海塩粒子量を低減すれば、更なる効果が期待できる。当所では、貯蔵施設もしくはコンクリートキャスクにおいて、自然空冷方式を採用した状態で、流入する海塩粒子量を低減する装置、すなわち除熱性能を損なわない低圧力損失の塩分流入低減装置（以下、低減装置）を提案した。低減装置は、図7-1-13に示すように貯蔵施設の給気口に設置され、その構造は、多段の板より構成されている。板間を空気が通過する際に、空気中の海塩粒子が板面で捕獲されることにより、流入する塩分量を低減するものである。ここでは、板面を水で濡らすことにより、塩分を潮解・捕獲するものとした。なお、低減装置は、コンクリートキャスクの給気口に設置して使用することも可能である。

#### (1) 低減装置の評価試験

低減装置の性能を評価するために、矩形（ $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ ）ダクト内に複数のステンレス板を流れ方向に均等な間隔で配置した試験装置を用いて、圧力損失試験および海岸に近い実環境（電中研横須賀地区臨界暴露実験場）での塩分低減試験を実施した。なお、塩分低減試験においては、板面を水で濡らした状態を保ち、塩分を含んだ空気を一定期間ブローで吸引し、低減装置で捕獲される塩分量の割合を実測により求めた。

ここでは、上記ダクト内に、長さ $300\text{mm}$ のステンレス板（厚さ $0.5\text{mm}$ ）を10枚配置した低減装置に対しての試験結果を紹介する。

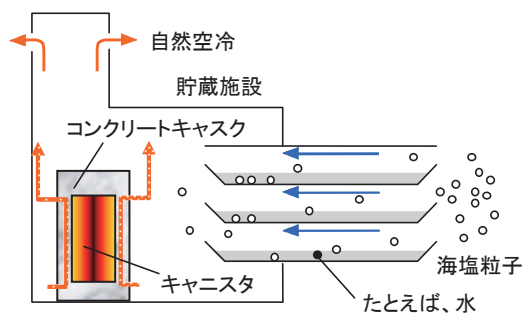


図7-1-13 電力中央研究所考案の塩分流入低減装置

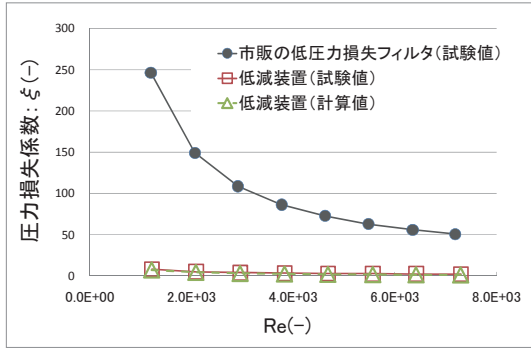


図7-1-14 圧力損失の比較

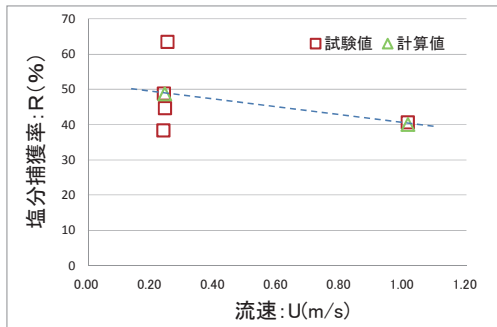


図7-1-15 塩分捕獲率

(a) 圧力損失試験

図7-1-14は、低減装置の圧力損失を市販の低圧力損失フィルタと比較したものである。低減装置の圧力損失係数(ξ)は、市販の低圧力損失フィルタのそれに比べて、1/30～1/20と小さいことが分かった。また、既存の圧力損失評価式を適用し、試験結果と比較することにより、評価式の妥当性が示された。

(b) 塩分低減試験

試験を実施した電中研横須賀地区臨界暴露実験場は、海岸から約50m離れた場所に位置している。試験では、

約1ヵ月毎に、低減装置で捕獲した塩分量の割合を実測より求めた。また、本サイトにおいて、テンラインサンプラーを用いた飛来粒子径計測を行ったところ、2.5 μm以下と10 μm以上をピークとする粒子径分布が計測されたことから、重力沈降効果に、上記の塩分粒子径分布を考慮することにより、塩分捕獲率を計算・評価した。図7-1-15は、試験値と計算値を比較したものである。

(2) 実機適用性評価

低減装置を図7-1-16に示すコンクリートキャスクの給気口に設置した場合の装置性能について検討した。なお、給気流速等の条件(表7-1-2)については、実物大コンクリートキャスクを用いた除熱試験結果<sup>9)</sup>を用いた。

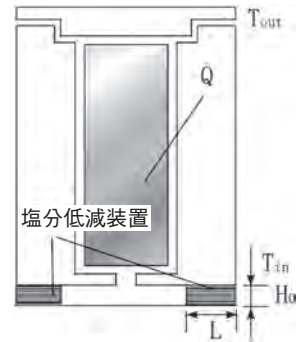


図7-1-16 低減装置の設置例

表7-1-2 設定したコンクリートキャスク条件

給気温度: Tin (°C)	33
排気温度: Tout (°C)	98
給排気温度差(計測値): ΔT (°C)	65
1基当たりのキャスク発熱量: Q (kW)	22.6
給気口での流速(計測値): U <sub>0</sub> (m/s)	0.865
給気口高さ: H <sub>0</sub> (m)	0.28
給気口幅: B (m)	0.3

表7-1-3 低減装置の性能評価

板枚数 n	一段当たりの流路高さ H (mm)	流路流速 u (m/s)	捕獲可能粒子径 dp (μm)	流路内の Re 数	圧力損失 ΔP (Pa)	圧力損失係数 ξ	上昇温度 δΔT	塩分捕獲率 (%)
1	279.5	0.867	87.7	1.54E+04	0.02	0.05	0.03	3.3
2	139.5	0.868	62.0	1.01E+04	0.04	0.08	0.05	6.6
3	92.8	0.870	50.6	7.56E+03	0.05	0.12	0.08	9.9
4	69.5	0.871	43.8	6.03E+03	0.07	0.16	0.10	13.3
5	55.5	0.873	39.2	5.02E+03	0.09	0.20	0.13	16.6
10	27.5	0.881	27.7	2.72E+03	0.19	0.44	0.28	31.7
12	22.8	0.884	25.3	2.30E+03	0.22	0.52	0.34	35.8
15	18.2	0.889	22.6	1.87E+03	0.32	0.74	0.48	40.0
18	15.1	0.894	20.7	1.57E+03	0.46	1.07	0.69	44.2
20	13.5	0.897	19.6	1.42E+03	0.57	1.33	0.86	43.4
21	12.8	0.899	19.1	1.36E+03	0.63	1.47	0.96	43.8
25	10.7	0.905	17.5	1.15E+03	0.92	2.12	1.38	44.9
30	8.8	0.914	16.0	9.62E+02	1.35	3.13	2.03	45.7
40	6.5	0.932	13.9	7.27E+02	2.53	5.86	3.80	46.8



低減装置の板厚 0.5mm、板長さを 500mm として、設置する板の枚数をパラメータとした場合の装置性能を表 7-1-3 に示す。その結果、15 枚の板を設置すると、塩分捕獲率 40% で、温度上昇は、0.48℃ となり除熱の妨げにならない低減装置を設置できることが分かった。

(3) 今後の課題

塩分粒子径分布のサイト依存性評価、低減装置で水を使わない場合に捕獲した海塩粒子の再飛散対策の検討が必要である。

## 7-2 耐震評価

国の定めた技術要件によれば、固縛しないコンクリートキャスクを用いた杭基礎で支持される中間貯蔵施設においては、コンクリートキャスクへの適切な設計地震力を設定し、転倒せず、隣り合うキャスクが緩衝せず、燃料への影響もないことを確認することが要求されている。これまでの地震時における固縛しないコンクリートキャスクの評価事例については、相似モデルによる振動試験や、燃料・バスケットのガタを考慮しない簡易モデルによる評価が実施されており、燃料のガタ系の挙動まで評価した事例は少ない。

本節では、固縛しないコンクリートキャスクについて、

上下動の影響や複数のガタ衝突による衝撃力が使用済燃料の構造健全性に及ぼす影響を評価した。

### 7-2-1 実物大コンクリートキャスク耐震試験

実規模大コンクリートキャスクを用いた大型振動台による振動試験<sup>1)</sup> およびその結果は、以下の通りである。

- ・耐震試験で使用する実規模大コンクリートキャスク（直径約 4m、長さ約 6m、重さ約 180t）、振動試験用模擬燃料集合体（PWR、BWR）、貯蔵施設床モデルなどの設計・製作を実施した。
- ・（独）防災科学技術研究所 E-ディフェンス（兵庫県三木市）の大型三軸振動台を用いて、3種類の地震波（El Centro、JMA 神戸、人工地震波など）を対象に、周波数特性試験や振動試験を実施した（図 7-2-1）。主な計測項目は、貯蔵容器の回転角度・角速度や加速度、滑り変位、キャニスタや燃料の加速度やひずみ、ガタ変位などである。試験では、コンクリートキャスクの固縛の有無、入力加速度レベル、上下動の有無をパラメータとして実施した（図 7-2-2）。
- ・ロッキングや滑り、回転を伴うコンクリートキャスクの 3 次元的な地震時応答を明らかにし、剛体の転倒限界評価式より得られる限界加速度を超えるレベルに増幅した波形を入力しても、コンクリートキャスクは転

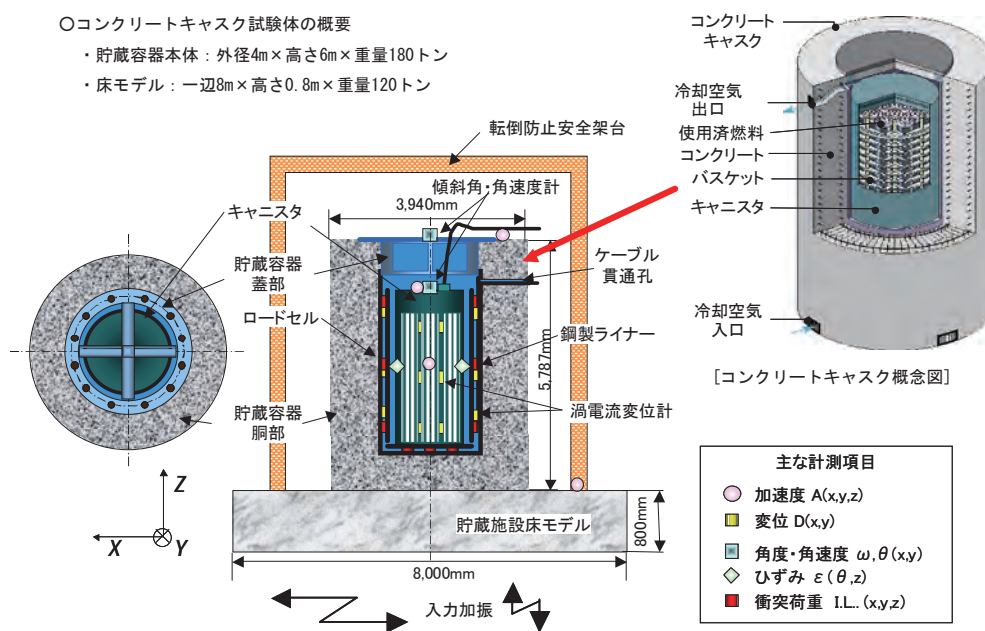


図7-2-1 大型三軸振動台による実物大コンクリートキャスク耐震試験

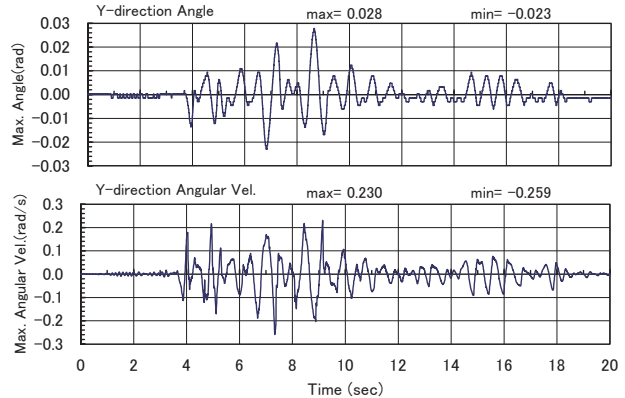
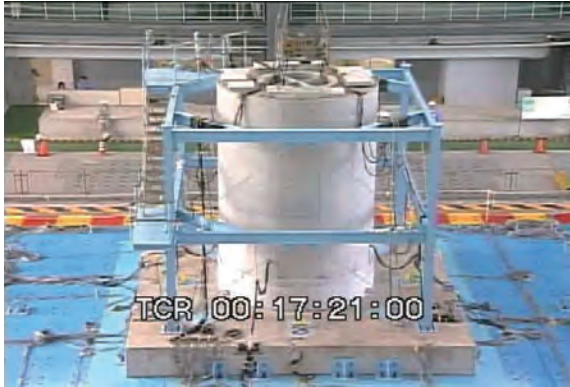


図 7-2-2 キャスクロッキング応答の例 (JMA 神戸波)

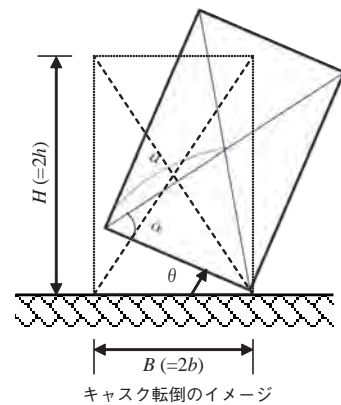
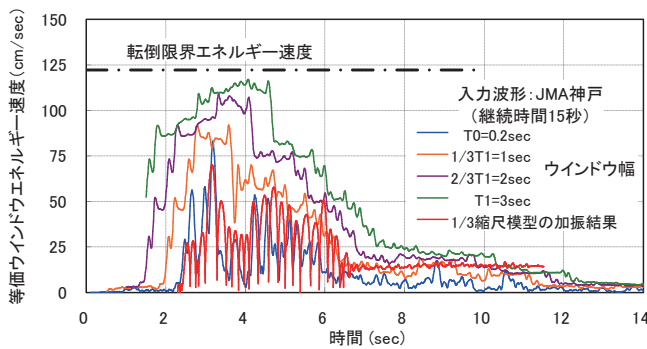


図 7-2-3 ウインドウエネルギーの適用性

倒に至らないことを明らかにした。

- ・ キャスクとキャニスタ間、キャニスタと燃料間のギャップにより、入力加速度が増加しても、燃料に発生するひずみは比例的には増加しておらず、対象とした地震入力の範囲では、燃料の応答は弾性範囲内に抑えられることが明らかとなった。

以上により、固縛しないコンクリートキャスクは、大きな地震力を受けても転倒安定性に問題はなく、燃料も健全であることが確認された。

### 7-2-2 地震時安定性評価手法の提案

縦置き・非固縛で貯蔵中の使用済燃料貯蔵キャスクが地震力を受けた際の転倒評価手法として、キャスクの浮上りに有効な入力エネルギー<sup>2)</sup>と、ある区切られた継続時間(ウインドウ幅:  $T_{window}$ )内に瞬間的に入力されるエネルギーとの相関に着目した、貯蔵容器の浮上に寄与する合理的なウインドウエネルギーを提案した<sup>3)</sup>。 $T_{window}$  の評価時間として周期変動範囲の長周期側  $T_l =$

$0.3\sqrt{a}$  の値 ( $a$ : 図 7-2-3 右図) を用いれば、ウインドウエネルギーの最大値は実験値(図 7-2-3 凡例中の加振結果のライン)の2倍程度の妥当な値を与えることが分かった。

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。

### 7-3 遮へい評価

図 7-3-1 に、コンクリートキャスクの安全機能を示す。国が定めた使用済燃料の貯蔵に関する規則によれば、事業者は1年ごとに収納燃料の閉じ込め性能を確認することを求めており、使用済燃料を包蔵するキャニスタの目視検査手法の実用化が重要となる。さらに、貯蔵期間中、使用済燃料からの放射線と崩壊熱が同時に作用するコンクリート部において、所定の遮へい性能が維持されるように、設計・製造段階で対策を講じておく必要がある<sup>1,2)</sup>。

本節では、アイダホ国立研究所において、15年以上屋外で使用済燃料を実貯蔵実験中(図 7-3-2)の VSC-

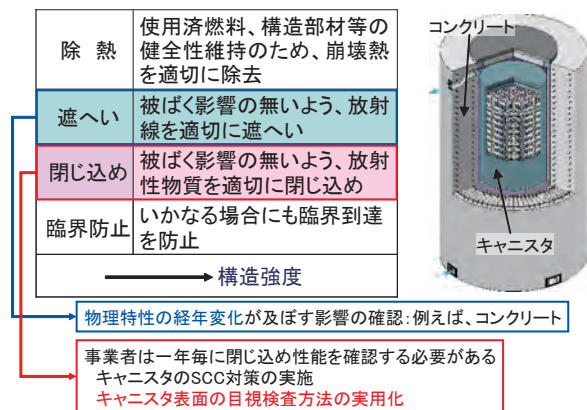


図7-3-1 コンクリートキャスクの安全機能

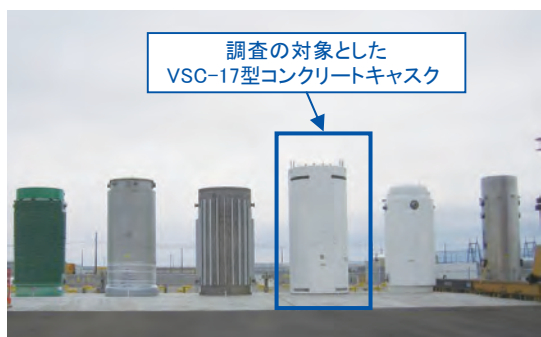


図7-3-2 アイダホ国立研究所で実貯蔵中のコンクリートキャスクを用いた実測試験

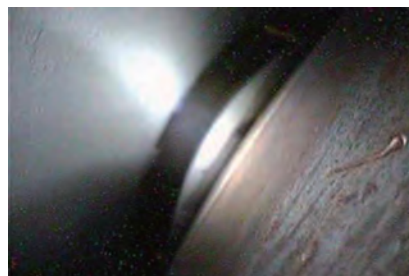
17型コンクリートキャスクの実測試験により、キャスク内部の表面状態、および遮へい機能に関わる物理特性の経年変化を明らかにした<sup>3)</sup>。

### 7-3-1 キャニスタ表面目視

図7-3-3に、ファイバースコープカメラを排気口から挿入し、キャスク内部の撮影を行いキャニスタ表面の目視検査を実施した例を示す。放射線環境場でも、自然色の表面状態の撮影が可能であった。撮影した画像データより、腐食対策を施した炭素鋼製キャニスタ表面には、閉じ込め性能の喪失を懸念させる腐食は見られていない。

### 7-3-2 キャスク表面状態の経年変化

コンクリートキャスクでは、排気口近傍のコンクリート温度が高く、貯蔵初期（総発熱量14.9kW）の最高温度は70℃であったが、15年経過後の最高温度は40℃と



(キャニスタ頂部付近)



(キャニスタ中央部溶接線付近)

使用した機器

- ・東芝製 IK-M44H ファイバースコープカメラ
- ・ズーム/アングル機能付 17mm 径プローブ
- ・インターライントランスファー型 CCD カメラ

図7-3-3 キャニスタ表面の目視検査例

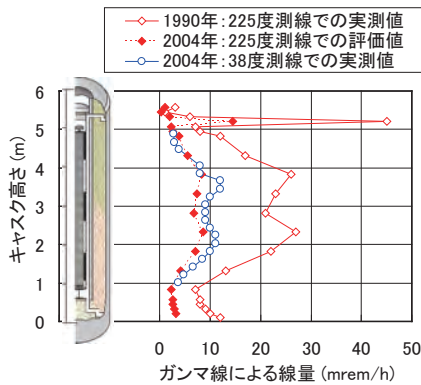
なった。さらに、シュミットハンマー法によりキャスク表面のコンクリート強度を測定した結果、平均値は47MPaであり、打設後28日強度33MPaを上回っており強度低下はなかった。

### 7-3-3 遮へい性能

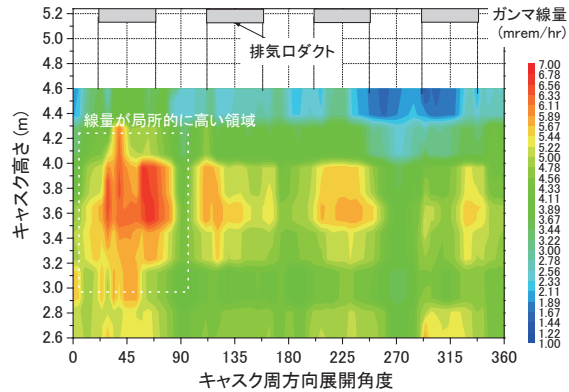
図7-3-4に、15年貯蔵後のコンクリートキャスクの遮へい性能の測定例を示す。15年貯蔵後のキャスク表面線量は、貯蔵初期に比べ約1/3に低減しており、線源の減衰低下による評価値とほぼ一致し、遮へい性能の低下はない。一方、排気口ダクトから下方2m付近までの範囲で、局所的なコンクリートの密度低下に起因する高い線量領域があることが確認された。

また、この領域で発生したひび割れの累積長さとは表面線量測定値との間に強い相関はなく、表面ひび割れの発生が放射線量に及ぼす影響は無視できる。

さらに、排気口ダクトから下方2m付近までの範囲でコンクリート弾性波速度分布の測定を行った結果、弾性波速度が局所的に低い部分が存在することが確認された。施工時のブリージング水が排気口ダクト直下に滞留



a) 15年貯蔵後のキャスク表面線量



b) キャスク側面におけるガンマ線の測定例

図 7-3-4 15年貯蔵後のコンクリートキャスクの遮へい性能

し、長期にわたる温度負荷により当該部の水分散逸による密度低下が進んだものと考えられる。排気口ダクト下面と鉄筋との狭隘部については、コンクリート種類の選択や施工方法の最適化など、十分な施工前の配慮が重要である。

## 参考文献

### 7-1

- 1) 谷 純一他：使用済燃料コンクリートキャスク貯蔵用キャニスタ候補材の塩化物応力腐食割れ特性（その4）－長期試験による SCC 寿命評価および SCC 発生感受性の電気化学的検討－、電力中央研究所報告、Q06001、平成 18 年 9 月。
- 2) 谷 純一他：使用済燃料コンクリートキャスク貯蔵用キャニスタ候補材の塩化物応力腐食割れ特性（その5）－ SCC 評価および塩分流入低減技術の考案－、電力中央研究所報告、Q06014、平成 19 年 6 月。
- 3) 白井 他、「コンクリートキャスク方式による使用済燃料貯蔵の実用化研究－ 304L ステンレス鋼キャニスタの塩化物応力腐食割れ防止に対する成立性評価－」電力中央研究所報告 N10035 (2010)。
- 4) J. E. Scheel, et al., "Mitigation of Stress Corrosion Cracking in Nuclear Weldments Using Low Plasticity Burnishing", ICONE16-48597, Orlando, Florida, USA, May 11-15, (2008).
- 5) T. Saegusa, et al., "Challenge to Overcome the Concern of SCC in Canister during Long-term Storage of Spent Fuel", International Conference on Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors, IAEA, Vienna, Austria, 2010.6.
- 6) 亘 他、「コンクリートキャスクのキャニスタ表面付着

塩分量評価－室内および実環境での付着塩分量測定試験－」電力中央研究所報告 N09023 (2010)。

- 7) 亘、「コンクリートキャスクのキャニスタ表面付着塩分量評価（その2）－実環境での気中塩分量および付着塩分量測定試験－」電力中央研究所報告 N11028 (2012)。
- 8) 竹田浩文、三枝利有：キャニスタ SCC 防止に対する塩分流入低減装置の開発（その2）－塩分流入低減装置の適用性評価－、電力中央研究所研究報告 N11044 (2012)。
- 9) 竹田浩文、亘真澄 他：コンクリートキャスクの実用化研究－通常時の除熱試験－、電力中央研究所研究報告 N04029 (2005)。

### 7-2

- 1) K. Shirai, et al.: Experimental Studies of Free-Standing Spent Fuel Storage Cask subjected to Strong Earthquake, PATRAM 2007, Miami, Florida, USA, 2007.
- 2) 秋山 宏他：エネルギースペクトルを用いた剛体の転倒予測、日本建築学会論文報告集、No.488、1996 年。
- 3) 白井孝治他：エネルギースペクトルによる使用済燃料貯蔵キャスクの転倒評価、L57、2008 年日本原子力学会春の大会。

### 7-3

- 1) 竹田浩文、亘 真澄、白井孝治、三枝利有：コンクリートキャスクの実用化研究－通常時の除熱試験－、電力中央研究所研究報告 N04029、2005 年 6 月。
- 2) 園部亮二、白井孝治、亘 真澄：コンクリートキャスクの遮へい性能評価、電力中央研究所研究報告 N06006、2006 年 12 月。
- 3) 白井孝治他：15年間貯蔵された VSC-17 型コンクリートキャスクの経年変化実測試験、電力中央研究所研究報告 N08057、2009 年 8 月。