

第 7 章

**コンクリートキャスク
実用化研究の将来展開
(実用化へのシナリオ)**

第7章 コンクリートカスク実用化研究の将来展開（実用化へのシナリオ） 目次

材料科学研究所	機能・機構発現領域	上席研究員	新井 拓
材料科学研究所	機能・機構発現領域	主任研究員	谷 純一
地球工学研究所	バックエンド研究センター	主任研究員	亘 真澄
地球工学研究所	バックエンド研究センター	上席研究員	竹田 浩文
地球工学研究所	重点課題責任者	研究 参 事	三枝 利有
地球工学研究所	バックエンド研究センター	上席研究員	白井 孝治

7 - 1	キャニスタ材の大気応力腐食割れ対策・評価	137
7 - 2	コンクリートカスク長期健全性実証試験	144
7 - 3	コンクリートカスクの耐震試験	145

新井 拓（98ページに掲載）
（7-1-1 執筆）

谷 純一（98ページに掲載）
（7-1-1 執筆）

亘 真澄（60ページに掲載）
（7-1-2 執筆）

竹田 浩文（60ページに掲載）
（7-1-3 執筆）

三枝 利有（8ページに掲載）
（7-2 執筆）

白井 孝治（8ページに掲載）
（7-3 執筆）

7-1 キャニスタ材の大気応力腐食割れ対策・評価

7-1-1 応力腐食割れ発生・破断試験評価

ステンレス鋼の大気応力腐食割れ（SCC）は金属表面に付着した海塩粒子が大気中の湿分によって潮解し、表面が濡れることによって発生すると考えられるため、100 以上であればSCCは発生しないものと予想される。貯蔵開始直後のキャニスタ表面温度はいずれの部位でも100 を超えると予想されるが、使用済燃料の冷却に伴いキャニスタ表面温度も低下する。キャニスタ表面温度は下部の方が低温であるので、貯蔵期間内にSCCの発生が懸念されるのは底部に近い部分である。キャニスタの胴は板を曲げて加工するため縦方向溶接があり、また、底部においては底板と胴をつなぐ周方向溶接および、周方向と縦方向の溶接が重なる部分もある。このような溶接残留応力が生じる箇所SCCが発生する可能性がある。

大気に含まれる湿分、すなわち絶対湿度は昼夜の変化もあるが季節によって大きく変化する。図7-1-1は敦賀測候所において1991年から2003年にかけて観測された毎時気温および相対湿度より求めた絶対湿度の時間変化である。キャニスタ表面温度の時間変化をたとえば図7-1-2のように仮定すると、図7-1-1の気象データと合わせることによって図7-1-3に示すようなキャニスタ表面の相対湿度の時間変化が得られる。海水の主成分は塩化

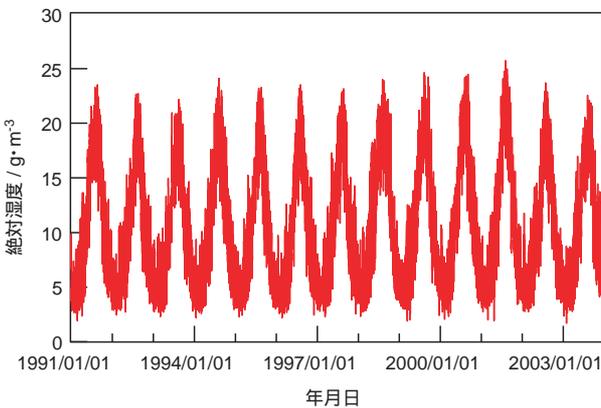


図7-1-1 敦賀測候所毎時気象データより求めた1991年から2003年までの絶対湿度の時間変化

ナトリウムであり溶質の約80%となっている。塩化ナトリウムに次いで多いのが塩化マグネシウムであり約10%の組成比である。塩化ナトリウムは常温から100 の範囲において、温度によらず相対湿度75%程度で潮解するが、塩化マグネシウムの潮解湿度は温度上昇によって若干低下するものの30～40%の範囲である。つまり、海塩が濡れる湿度を決定するものは塩化マグネシウムと考えてよい。つまり図7-1-3において35%程度を境として、キャニスタ表面が濡れる期間と乾いている期間が存在することになり、SCC発生の可能性が生じるのは表面が濡れている期間のみであると考えられる。

図7-1-3に従えば、キャニスタ表面温度の低下に伴って表面が濡れる時間割合は増加することになる。このため、低温側でSCCが発生しなくなる温度境界があるか否かを調べる必要がある。以上述べたことをキャニスタ

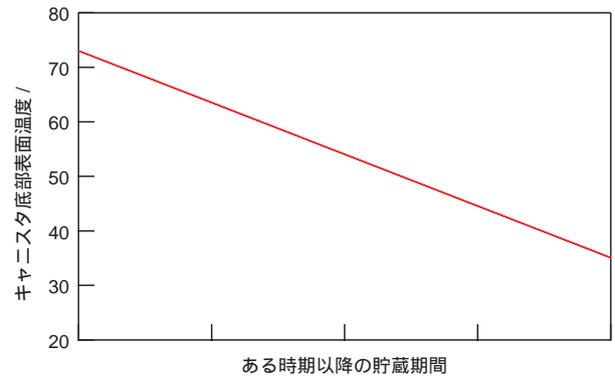


図7-1-2 単純化したキャニスタ表面温度の時間変化（詳細な解析データではない）

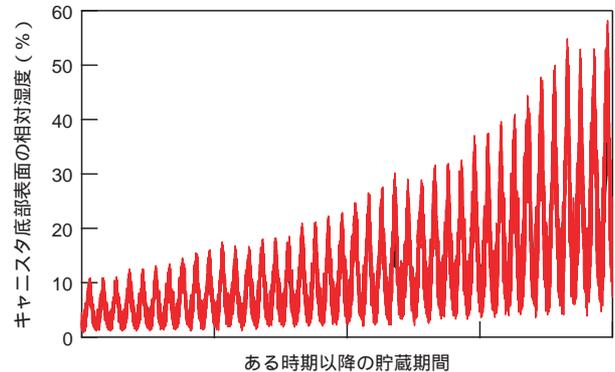


図7-1-3 キャニスタ表面の相対湿度変化のイメージ

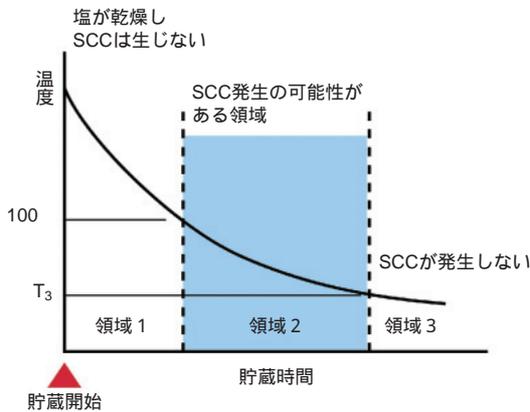
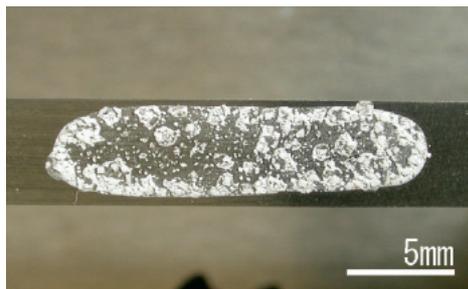


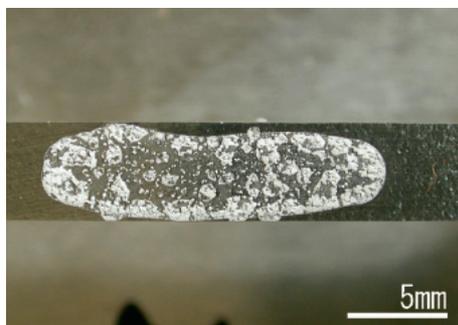
図7-1-4 キャニスタ表面の温度に基づく SCC評価の考え方

の貯蔵期間全体にまとめ直したものが図7-1-4である。図において、領域1の100以上においてSCCが発生しないこと、領域2で示した時間内にSCCが発生しないこと、領域3で示すSCCが発生しない温度域が存在することがそれぞれ確認できれば貯蔵期間内においてSCCによってキャニスタが損傷する可能性は十分に低いことが示される。

まず高温域の領域1においてSCCが発生しないことを調べるために100、大気中において定荷重引張試験



(a) SUS329J4L 1.2 y



(b) YUS270 1.5 y

図7-1-5 100 大気中で13,000h保持後の試験片表面の様子

を行った。図7-1-5はキャニスタ候補材のSUS329J4LとYUS270をそれぞれ溶接残留応力相当の荷重で保持し、表面には実環境で想定される以上の10g/m² as Clの海塩を付与し、13,000h試験した後に撮影した試験片表面の写真である。いずれの試験片においても錆の発生もき裂の発生も認められないため、100以上においてはSCCが発生する可能性は極めて低いことが示された。

次に領域2においては前述の通り、図7-1-6に示されるような表面相対湿度の時間変化が生じる。図中における海塩が濡れる積算時間（濡れ時間）を求め、5-3節の図5-3-6に示したような長時間SCC試験によるSCC破断時間と比較し、SCC破断時間が濡れ時間を上回ることが確認できれば領域2においてSCCが発生する可能性は極めて低いものと推定される。なお、試験片の板厚が2mmであるので、試験片破断時間はSCC発生時間と工学的にはほぼ同等であるとみなすことができる。今後、濡れ時間の試算と、図5-3-6よりも長時間のSCC試験データを取得することによって評価を進める予定である。

最後にSCCが発生しなくなる領域3の上限温度の評価について述べる。SCCは塩化物による孔食もしくは海塩粒子および堆積物によるすき間腐食が起点となって生じるものと考えられる。いずれの現象についても、それらが発生する化学的ポテンシャルのしきい値がある。金属試験片に塩化物溶液中でバイアス電圧を印加する試験を行えば、孔食が発生する電位もしくはすき間腐食が発生する電位（すき間腐食再不動態化電位）を求めることができる。一方、キャニスタ表面などの大気中にある金属表面は表面電位を計測すれば化学的なポテンシャルを知ることができる。つまり、図7-1-7に示すように、孔食電位、すき間腐食電位および表面電位を、温度をパラメータとして取得し、表面電位が孔食電位またはすき間腐食電位を下回る温度が得られれば、それ以下の温度

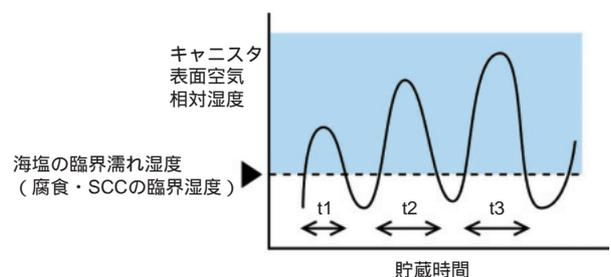


図7-1-6 領域2において試験片表面が濡れる時間

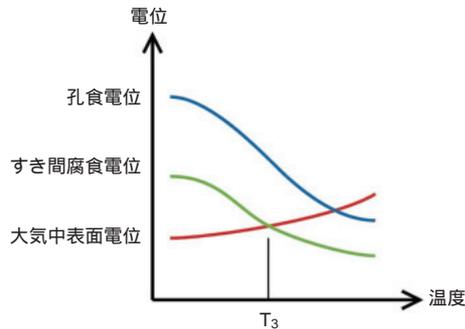


図7-1-7 領域3の上限温度 T_3 を決める考え方

ではSCCの起点となる腐食が発生せず、SCCも発生しないと云える。現在のところ、5-3節で図5-3-1に示したように、孔食電位の温度依存性は取得した。今後、すき間腐食電位および大気中における表面電位を取得し、これらを比較することによってSCCが発生しなくなる上限温度を評価する予定となっている。

7-1-2 塩分付着解析・試験

キャニスタのSCC評価のアプローチでは、7-1-1項に示されているように、どの程度の塩分が付着すると発錆するか、また、SCCのき裂がどの程度の時間で、進展していくかを評価する方法とキャニスタ表面にどの程度の塩分が付着していくかを評価する方法の両方が必要となる。以下に、 T_3 についての今後の進め方について、記述する。

(1) 貯蔵施設の飛来塩分環境

日本では、使用済燃料の輸送が船で行われることから、中間貯蔵施設の立地は、海岸近くなることが予想される。中間貯蔵施設は、コスト低減を図るため、自然空冷方式の採用が計画されており、海からの風によって運ばれてくる海塩粒子は、貯蔵建屋内に入り込む。海塩粒子の飛来については、これまで、“塩害”や気象の分野で研究が進められてきた。塩害の対象となってきたのは、主に農業や土木（コンクリート構造物や橋梁など）¹⁾、電気設備（碍子など）、鋼構造物の腐食やSCCである。

海塩粒子とは、主として、海で風と波との相互作用で生成された海塩の微粒子で、大きさは乾いた核の径で10 μm 程度以下である²⁾。この粒子は、相対湿度が75%より高いときは溶液滴の状態で存在するが、75から

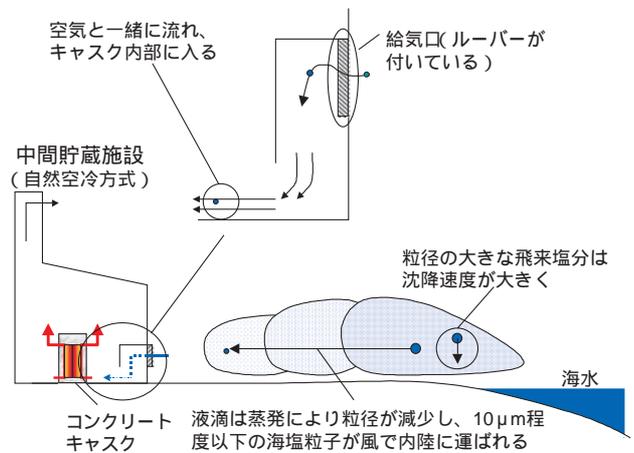


図7-1-8 海塩粒子の挙動の概念図

30%程度までは、過飽和溶液滴、または、乾いた塩粒として存在する。岸壁や防波堤などでは、1 mmを超えるような飛沫も発生するが、これらの粒子は沈降速度が大きいため、ほとんどがすぐに地面に落下する。一方、10 μm 程度以下の粒子は、沈降速度が小さく、風と一緒に内陸まで運ばれる。従って、貯蔵施設内に侵入することが予想される海塩粒子は、この10 μm 程度以下の粒子が対象である（図7-1-8）。

従来の塩害評価の手法は、大きく以下のように区別される。

- 対象物に付着した塩分量を実際に測定する
- 気中の塩分量を測定する
- 解析により飛来塩分量を予測する

については、例えば、橋梁や碍子、発電所の配管等で、実際に付着塩分量が測定されている。これらの対象物は、一般に、屋外に設置されている場合がほとんどで、雨によって付着した塩分が洗い流されることの影響が含まれる。また、気中塩分量や気象条件（風速、温度、湿度等）との相関が明確ではなく、塩分付着の履歴（例えば、途中で洗浄や塗装が行われたりすること）も長期に亘って記録されているケースは観られない。については、ガーゼ式³⁾や土研式⁴⁾と呼ばれる計測器を使っての現場計測が数多く実施されている。これらの測定でも、気象条件との相関が明確でないものが多いが、の解析の検証用データとしては有益である。特に、最近、電中研が開発したエジェクタ式気中塩分計（図7-1-9）は、捕集効率が高く、今後、いろいろな地点での計測データの蓄積を図っていくことが望まれる⁵⁾。



図7-1-9 エジェクタ式気中塩分計

、 の欠点を補う意味でも、 は重要である。解析は、主に拡散方程式を解くもので、最近では、地形や障害物の影響を考慮した3次元解析も行われている。電中研でも、塩分飛散予測モデルを開発し、上述のエジェクタ式気中塩分計の計測結果による検証を進めている⁽⁵⁾。著者らの研究では、貯蔵建屋給気口外側での気中塩分の条件を、本解析モデルによる解析で決定する。

貯蔵建屋の給気口から進入する気中塩分濃度は、建屋内に入っても、変化は少ないものと予想される。従って、コンクリートキャスク給気口での気中塩分濃度も、保守性を考慮し、貯蔵建屋給気口外側での条件を使うことが妥当であろう。

(2) コンクリートキャスク内の飛来塩分環境

コンクリートキャスクは、収納した使用済燃料の崩壊熱を自然空冷で除去する方式で、給気口から流入する空

気がそのままキャニスタ表面と接触して熱を取り去る。従って、流入する空気が海塩粒子を含む場合には、海塩粒子がキャニスタ表面に衝突し、ある確率で付着することになる。従来の研究では、評価対象に対して、その周囲の気中塩分濃度と付着割合の関係が明らかにされていない。付着割合は、付着面近傍での流れに大きく影響を受けるため、熱流動評価と連動させた評価が必要である。しかし、これまでの塩害評価で対象としてきた構造物が比較的大きな構造物であったことから、局所的な流動と付着塩分との関係を明らかにした事例はほとんど見られない。流れと粒子の付着（あるいは蓄積）の観点からは、混相流の分野で、液滴や粉体の噴霧流、あるいは、配管や炉内の二相流として、これまで多くの研究が実施されている。従来の研究と、コンクリートキャスク内の流動場での相違点として、流れが自然対流であることと、対象物であるキャニスタ表面が高温であることが挙げられる。キャニスタの側面では、表面近傍に流れの境界層が存在し、この領域内では、高温で流速の速い流れとなっている。図7-1-10に、4-2節に示した実験で得られたキャニスタ表面温度と発熱量の関係を示す。SCC評価では、温度が100以下に下がって水分が存在する状態が問題となる。図を見てわかるように、貯蔵末期の発熱量10kWでは、キャニスタ底部付近で、100を下回る部位が発生している。キャニスタ底部付近には溶接箇所が存在するため、この部分が最もSCCの発生が懸念される箇所である。塩分付着の観点からは、貯蔵初期の100を超える状態から蓄積が始まるものと予想されることから、付着割合のデータは、100を超える高温領域でも取得する必要がある。

コンクリートキャスク内の環境条件として、もう一つ

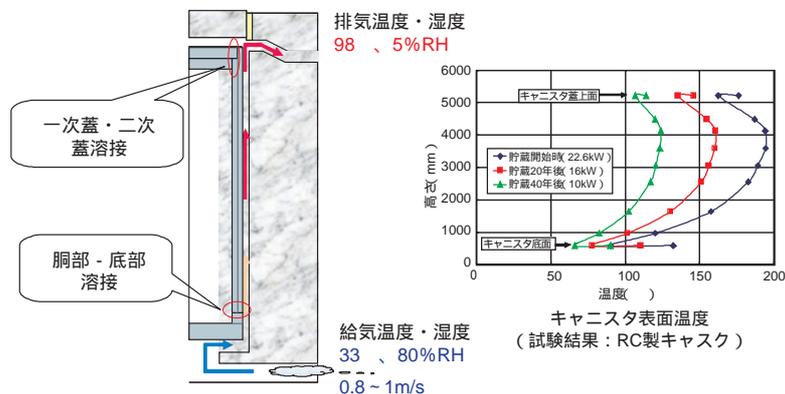


図7-1-10 RC製キャスクの冷却空気およびキャニスタ表面温度条件

湿度条件が挙げられる。4-2節で述べられている通り、実験結果から給排気口の空気温度差は、RC製キャスクの場合、65 となっている。この条件で、入口空気の湿度を80%RHとすると、出口では5%RHとなる。この数字から明らかなように、流路内は非常に乾燥した状態である。

(3) 付着塩分量測定試験・解析

キャニスタ表面への塩分付着量を予測する手法を構築するため、試験および解析を実施する。試験装置の概念図を図7-1-11に示す。

装置は、簡易風洞、ブローア、温湿度調節器、試験片加熱ヒータ、塩水噴霧器等から構成される。試験では、風洞を流れる空気に塩水を噴霧することにより、空気中に一定量の海塩粒子を含ませ、風洞の下流に設置した試験片上に付着する塩分量を測定する。試験パラメータは、以下の通りである。

- ・試験片(材質、表面粗さ)
- ・雰囲気温度
- ・風洞設置角度(水平・垂直)
- ・吹き付け流速・角度
- ・試験片温度
- ・試験時間
- ・塩分濃度

本試験は、現在、実施中である。さらに、次のステップとして、実物大コンクリートキャスクあるいはセクタモデルを使用して、給気口から海塩粒子を含んだ空気を流入させ、キャニスタ表面に付着する塩分量を測定する試験も計画中である。

一方、並行して、塩分付着量を評価するための解析を実施し、予測手法の構築を行う。解析は、4-4節で述べ

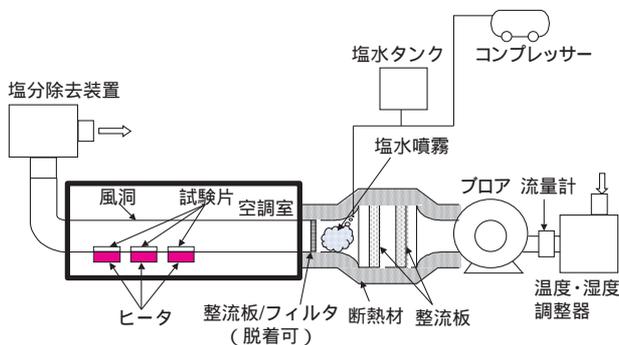


図7-1-11 塩分付着試験装置の概念図

られているコンクリートキャスクの熱流動解析に、海塩粒子の壁面への衝突・付着を組み合わせたモデルとする。海塩粒子の付着割合は、上記の試験で得られた条件を与え、試験結果を使って検証を行いつつ、解析手法を構築していく予定である。

7-1-3 塩分流入対策技術の開発

コンクリートキャスクでは、自然空冷により、冷却空気をキャスク内部に取り込み、除熱が行われるシステムが採用されている。コンクリートキャスクが収納される中間貯蔵施設においても、自然空冷で、給気口より冷却空気が取り込まれることになるが、施設が海岸近辺に立地された場合、冷却空気に海塩粒子が含まれている可能性があり、その塩分がコンクリートキャニスタ内のキャニスタ表面に付着した際、SCCを発生させることが懸念される。

SCCの発生を防止するためには、キャニスタ表面に付着する塩分濃度がSCCの発生に対する限界の表面付着塩分濃度を超えないようにする必要がある。これに対して、当所では、図7-1-12に示すように、電中研で開発したコードにより、海岸から施設までの飛来塩分の粒径および個数密度の評価を行っている。また、7-1-2章で述べた様に、キャニスタ表面である加熱面にどれだけの塩分が付着するかを実験および解析から定量的に評価することを計画・実施している。

ここでは、中間貯蔵施設内への塩分流入を低減する対策を考案し、その効果を定量的に評価することを目的としている。

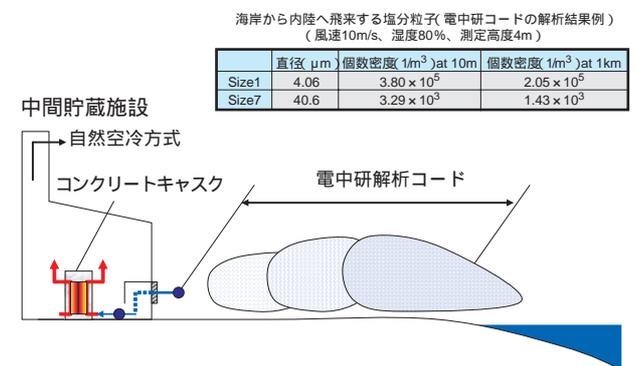


図7-1-12 中間貯蔵施設への飛来塩分量

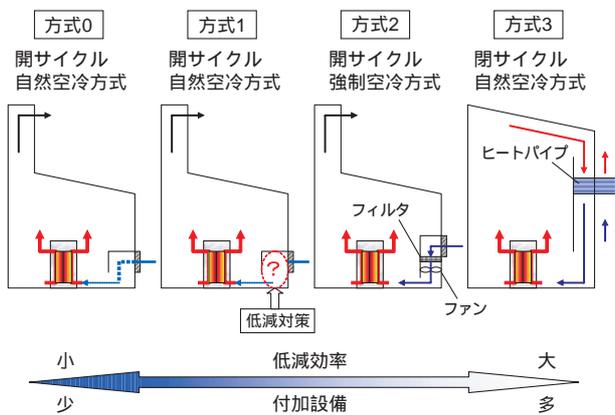


図7-1-13 中間貯蔵施設としての塩分流入対策

(1) 中間貯蔵施設としての塩分流入対策方式

中間貯蔵施設が海岸近辺に立地された場合、施設内への塩分流入の低減対策としては、図7-1-13のような方式が考えられる。方式0は、従来の方式であり、特に対策を施さないものである。方式1は、施設の給気口に塩分流入を低減させる対策をほどこすが、冷却空気は、従来通り、自然冷却方式を採用するものである。方式2は、給気口にフィルタを設置するものであり、この場合は、フィルタ部の圧力損失が大きくなるため、施設内に冷却空気を取り入れるには、ファンを使った強制冷却方式になる可能性が大きい。なお、ファンを使用する場合は、ファンの停止時における安全性の確保も問題となる。方式3では、ヒートパイプを用いた閉サイクル型の自然冷却方式であり、施設内への塩分の流入は、ほとんどないが、設備が大掛かりとなるとともにヒートパイプのメン

テナンスの必要性が発生する。

図中、左から右の方式になるほど、塩分低減効果は、高まるものの設備コストの増大が考えられる。

本研究では、コストおよび安全性の面から、開サイクル方式、自然空冷を検討の前提条件として、上記の方式0～方式3の中から方式2を対象に検討をすすめることとする。よって、この方式で求められる条件としては、圧力損失が少ない、低コスト(ランニングコストも含む)、設備が小規模、設備構造が単純、メンテナンスの容易性が技術的な課題として挙げられる。

(2) 既往技術

一般施設への粉塵除去には、これまでにいろいろな方式が使用されている。表7-1-1は、これらをまとめたものである。工場・エンジン等の排出ガスから粉塵・有害物質を除去、クリーンルーム等にとり入れる空気から粉塵(海塩粒子を含む)・有害物質を除去するためのものであり、ほとんどのものが強制循環方式で、自然循環方

表7-1-1 粉塵除去の主な方式

		圧力損失 (mmAq)	分離限界粒径(μm)
乾式	フィルタ	150～250(バグフィルタ)	0.1～0.3
		20～100(充填層式)	0.03～10
	慣性集塵	50～300	10～30
	遠心力集塵	100～300(サイクロン)	3～10
	重力集塵	20	50
乾式/湿式	電気集塵	20～50	0.2～0.4
湿式	スクラパー	100～300	0.7～3

出典：化学工学便覧

表7-1-2 海塩粒子除去の例

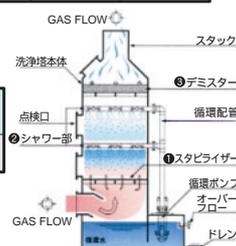
海塩粒子フィルタの例

()内は、最終圧力損失

メーカー名	形状(縦×横×厚さ) mm	ろ材	捕集効率(%)	定格流量(m³/min)	圧力損失(Pa)
1 日本ケンブリッジフィルタ	610×610×292	グラスファイバ	90 60	56	98(343) 78(245)
2 アクシクリーンエアソリューション	610×610×30	エレクトレット複合不織布	90	20	52(200)
3 ミドリ安全	610×610×290	グラスペーパー	95	56	108(324)
4 ニッタ	610×610×150		98	56	95(300)

スクラパーの例

メーカー名	形状(縦×横×厚さ) mm	捕集効率(%)	定格流量(m³/min)	圧力損失(Pa)
1 協和化工	2730×1310×3600	80～90	51～80	300



式のもの、あまり例がない。

特に、海塩粒子の除去例については、表7-1-2に示すような、フィルタを使うものやスクラバー方式が採用されているが、いずれも圧力損失が大きいものしか採用された例がない。

(3) 塩分流入対策案

本研究では、前述したように、低コストで圧力損失の小さい塩分流入低減装置の開発を目指している。しかし、従来技術では、これを満たすものが無いために、新たな流入塩分低減対策方法を提案し、定量的な評価を行うことを目標としている。

図7-1-14は、貯蔵施設の給気口に設置する流入塩分低減装置案の一例である。

一つの方法としては、給気口から流入する塩分を含んだ空気に水を噴霧して、塩分を低減する方法である。また、他の案としては、低圧力損失のフィルタの開発である。

なお、試験では、図7-1-15に示す様な一定濃度の塩分を含んだ空気を発生させることができるダクト内に上で述べたような流入塩分低減装置を組み込み、ダクト形状(長さ、流路高さ等)、水の噴霧方式および噴霧量、流入空気流速、流入空気に含まれる塩分濃度をパラメータとして、ダクト通過前後での塩分低減量および圧力損失

を計測・評価することにより、最適な塩分低減装置を提案することとしている。

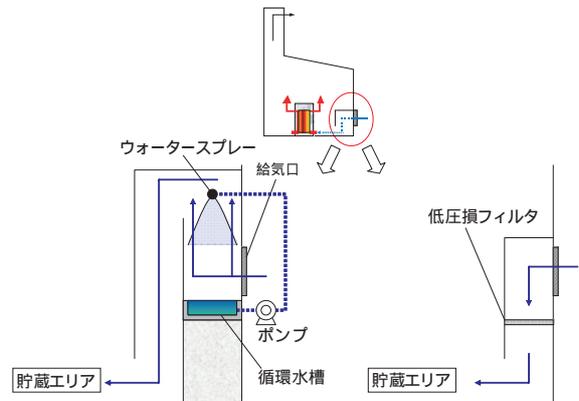


図7-1-14 塩分流入対策案

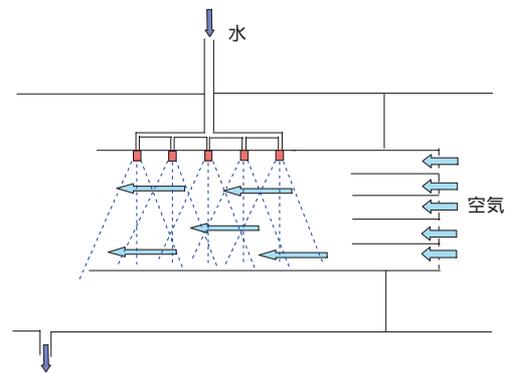


図7-1-15 試験例

7-2 コンクリートキャスク長期健全性実証試験

わが国では、中間貯蔵期間は40～60年とされており、コンクリートキャスクの長期健全性が問題となる。コンクリートは原子力施設の遮蔽材として、古くから使用されており、コンクリートの経年劣化に関する研究は1940年代から行われており、最近5年間でこの種の研究が増加している。米国アイダホ国立研究所には1990年以来、約15年間、使用済燃料貯蔵を続けているコンクリートキャスク(VSC-17)がある。VSC-17型コンクリートキャスクは、ロッドコンクリートソリデーションされたPWR型使用済燃料集合体17X2体分の使用済燃料を貯蔵している。当所は、アイダホ国立研との共同研

究により、本コンクリートキャスクの経年劣化を調査・試験している。

(1) 文献調査⁽¹⁾

コンクリートの照射劣化には二つのメカニズムがある。第一は照射による材料の物性変化であり、材料の結合を壊すものや材料の脆化をもたらすものである。第二のメカニズムは、照射による局所的な温度上昇である。照射量が50年間で、 10^{10} n/cm²以下の中性子や 10^{10} Rad以下のガンマ線によるコンクリートへの影響は無視できようである。このことは、ASMEやANSIの出版物により支

持されている。100年以上の照射効果は研究されていない。より、高い照射量の影響は不明確で異なる結果が報告されている。ある種のコンクリートは 10^{10}n/cm^2 以上の中性子照射により、圧縮強度や引張強度が低減させる可能性がある。その影響は、中性子のエネルギースペクトルやコンクリートの成分に依存する。 10^{20}n/cm^2 の中性子や 10^{10}Rad 程度の高照射によるコンクリートの圧縮強度や引張強度の低減及び容積の大幅な増加が報告されている。これは、骨材の膨張とセメントペーストの収縮による。これらの結果が、加熱と水分喪失または直接的な照射効果によるものか否かは不明である。コンクリートを高温度に長期間さらした場合、圧縮強度の低減、弾性係数・クリープ抵抗・伝導度・拡散係数の変化をもたらす。劣化の閾値は95であり、その影響は、温度と時間の増加とともに増加する。急激な温度上昇や熱的サイクルはコンクリートの重大な劣化をもたらす。

(2) VSC-17型コンクリートキャスクの目視検査⁽¹⁾

除熱のための空気の流路となる部分及びキャニスタの支持構造物に、顕著な経年劣化は観察されなかった。本キャスクの除熱空気流路部分の中性子フラックスは 10^3mR/hr であった。この線量値及び真夏に測定された空気流路部分の温度の組み合わせを考慮しても、コンクリートの放射線分解または熱的乾燥は考えられない。小

規模な表面ひび割れがまばらに観察された以外に目立った劣化は無いことが、この考えを支持している。

(3) 温度測定、シュミッドハンマー試験、超音波試験⁽²⁾

キャスク全体の温度測定の結果、大きな変化は無い。このため、熱伝達は比較的均一で、高温度が排気口で測定される。遮へい部材の変化による温度の不連続点も無かった。シュミッドハンマー試験データのバラツキは少ない。一部の排気口の下部に遮へいのホットスポットが観察されているが、これまでの超音波試験の結果では、製造時の不具合によるものと考えられている。この部分にコンクリートが十分に充填されなかった可能性が高い。



図7-2-1 コンクリートキャスクの非破壊検査の様子

7-3 コンクリートキャスクの耐震試験

7-3-1 目的

長期の貯蔵期間中に地震を経験することが予想される貯蔵容器は、バスケット、燃料等の間に複数のガタを有する系であり、また今後建屋に固縛しない自立設計の貯蔵容器も想定されている(図7-3-1参照)。

一方、これまでの強震時における貯蔵容器の応答に関する評価事例については、相似則を適用したスケール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貯蔵容器単体モデルによる解析が実施されており、燃料の挙動まで評価した事例は少ない。

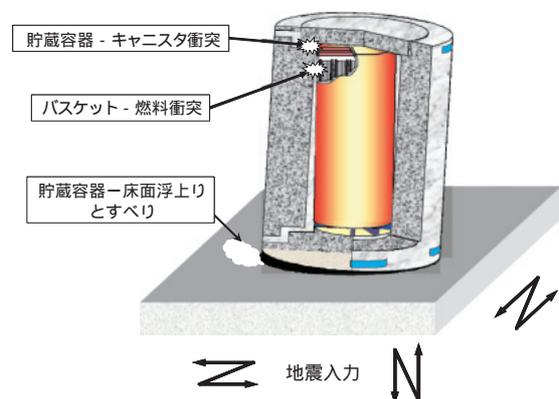
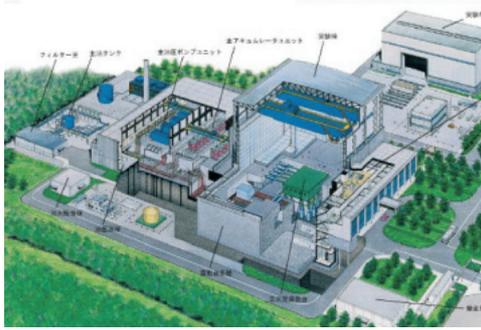


図7-3-1 地震時における貯蔵容器のガタ系の挙動



[施設鳥瞰図]

所在地	兵庫県三木市
最大搭載質量	1,200 t
搭載面積	20m × 15m
駆動方式	アキュムレータ蓄圧 / 電気油圧制御
加振方向	水平垂直同時3軸
最大速度	水平 200cm/s 垂直 70cm/s
最大加速度	水平 900cm/s ² 垂直 1500cm/s ²
最大変位	水平 ±100cm 垂直 ±50cm

図7-3-2 E-ディフェンスの主な仕様

本試験では、実規模大の使用済燃料貯蔵容器を用いて、大型三軸振動台によるバスケットや燃料のガタ系における相互作用を考慮した振動試験を実施し、燃料集合体のガタ振動時の特性や複数の燃料集合体の応答位相差による群効果を明らかにする。

耐震用試験体の製作

耐震試験で使用する実規模大貯蔵容器（コンクリートキャスク）、振動試験用模擬燃料集合体（PWR, BWR）貯蔵施設床モデル等の設計・製作を実施する。

三軸大型振動台による振動試験

振動試験は、文部科学省管轄の防災科学技術研究所の大型三軸振動台（実大三次元振動破壊実験施設「通称：E-ディフェンス」：図7-3-2参照）を用いて実施する。

実規模大貯蔵容器地震時応答評価

振動試験結果に基づき、地震時における貯蔵容器や内部収納物（燃料集合体やバスケット等）の挙動を把握し、複数の燃料集合体の応答位相差による群振動の影響や燃料集合体のガタ振動時の特性を明らかにする。

7-3-2 試験行程

図7-3-3に、耐震試験の実施フロー（平成16年度～

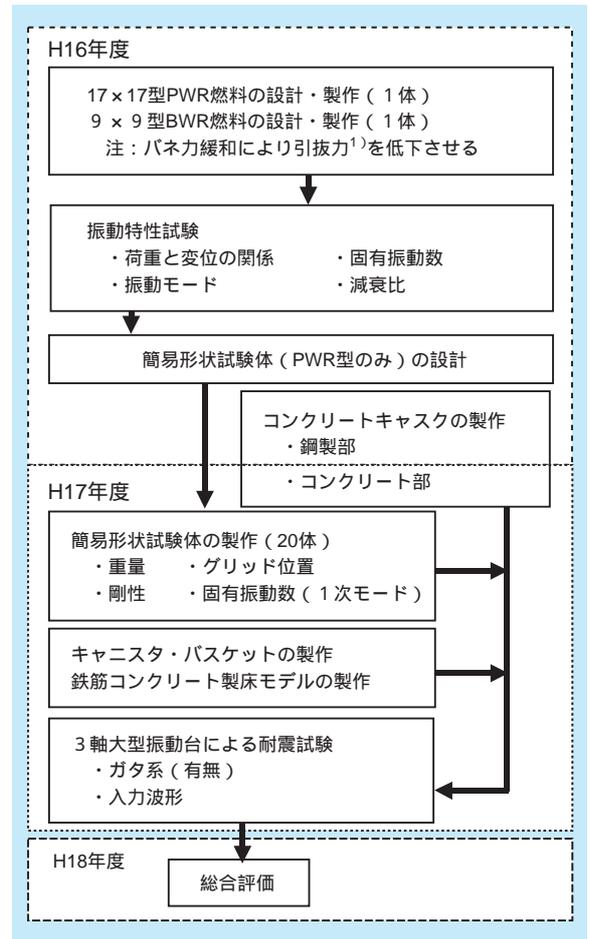


図7-3-3 耐震試験の実施フロー

平成18年度までの3カ年）を示す。E-ディフェンスを使用した振動試験は、平成17年度に実施する。

7-3-3 耐震用試験体

本試験では、第4章で検証を行ったコンクリートキャスクの仕様を参考にして、実規模大の使用済燃料貯蔵容器や模擬燃料集合体を製作する。

(1) 耐震試験用PWR 模擬燃料集合体

ペレット以外は実機相当の構成品を用いた17×17型実尺模擬燃料集合体モデル1体（図7-3-4参照）と等価模擬燃料体20体（図7-3-5参照）を製作する。

実尺模擬燃料集合体モデルのペレットは、二酸化ウランの代わりに重量と形状を模擬した鉛・アンチモンペレットを使用する。さらに、グリッドセルのリサイズを行い、グリッドバネ力を使用済燃料相当（目標緩和率15～20%）に低減する⁽¹⁾。

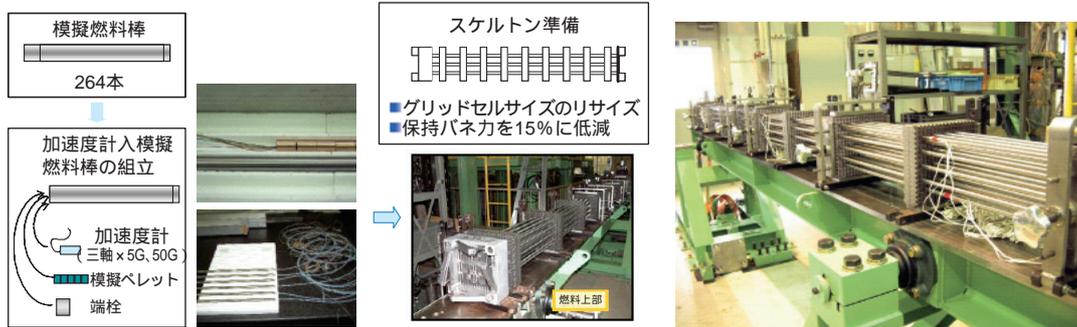


図7-3-4 PWR実尺モデルの製作

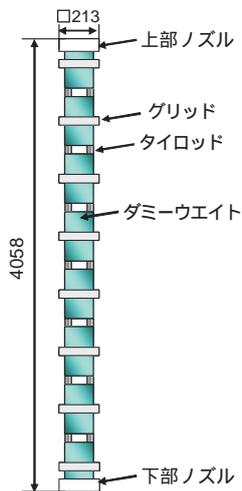


図7-3-5 等価模擬燃料体の基本構造

等価模擬燃料体については、上下部ノズルを固定条件とした際の一次固有振動数と等価とするように剛性や質量分布を決定する。すなわち、グリッドスパン毎の重量をグリッド位置に集中質量として燃料中心軸に配置し、全体の曲げ剛性は、外周部コーナーに配置した中空鋼管のタイロッドで保持し、直径や肉厚で固有振動数を調整した。なお、横方向の剛性は無視した。

(2) コンクリート製貯蔵容器

貯蔵容器の主な仕様は、下記のとおりである。

寸法：貯蔵容器部：外径3.9/内径1.8 × 高さ5.3m

底部：外径3.9 × 高さ0.5m

鉄筋種類/サイズ：SD345/D25

鉄筋位置：内外周筋、内外縦筋

コンクリートかぶり：60mm

コンクリート種類：低熱セメント

コンクリート設計基準強度：24Mpa

底面の摩擦係数の影響を評価するため、底部の円板スラブは着脱式とし、接触面は2材料（鋼材とコンクリート）とした。また、給排気口等の詳細は省略した。

キャニスタ衝突時の衝撃力や滑り量を測定するため、貯蔵容器内面の鋼製ライナー部の側板や底板間に渦電流変位計やロードセルを設置した。

(3) キャニスタ

キャニスタの寸法は、外径1638mm、高さ4453mm（キャニスタ吊具を除く）であり、重量は単体重量約13トン、（PWR燃料集合体21体装荷時 約27トン）である。主要部品の材質は、本体はステンレス鋼、バスケットはアルミ、蓋は炭素鋼であり、蓋部構造は簡略化し、ボルト止め構造とした。

バスケットは、押出成形で製作した中空状のアルミ板を格子状に組み上げた構造とし、バスケット格子内に渦電流変位計・ひずみゲージを埋め込み、燃料集合体の挙動を計測する。

図7-3-6に、キャニスタの仕上がり状況を示す。

(4) 貯蔵施設床モデル

耐震試験に使用する貯蔵施設の床を模擬した鉄筋コンクリート床版の主な仕様は、下記のとおりである。

寸法：8 × 8 × 0.8m



図7-3-6 キャニスタの仕上がり状況

鉄筋種類/サイズ：SD345/D22
 鉄筋位置：上・下面
 長辺・短辺方向：ピッチ 200mm
 コンクリートかぶり：100mm
 セメント種類：低熱セメント
 設計基準強度：24Mpa

7-3-4 試験計画

(1) 試験項目

表7-3-1に、耐震試験の実施項目を示す。

表7-3-1 耐震試験の実施項目

I 燃料集合体振動特性試験 ・無負荷状態の振動台の特性把握 ・燃料集合体単体の振動特性の把握	安全評価で使用する解析ツールへの入力データの根拠
II 摩擦特性試験 ・容器底部の摩擦特性評価	
III キャニスタ耐震試験 ・キャニスタの転倒挙動評価 ・燃料とバスケットのガタ衝突による相互作用に係わる応答特性評価	金属キャスクに動的地震力が作用した場合の収納物の健全性評価 ・固縛要否の判定基準の設定 ・燃料健全性の評価基準
IV CFS製キャニスタ耐震試験 V RC製キャニスタ耐震試験 ・350ton載荷状態の振動台の特性評価 ・底面の摩擦特性の影響評価 ・固縛/非固縛状態のキャスクの応答評価 複層のガタ系の影響が貯蔵容器全体の浮上り挙動や燃料健全性に及ぼす影響評価	コンクリートキャスクに動的地震力が作用した場合の収納物の健全性評価 ・固縛状態の貯蔵容器の挙動評価 ・複数のガタ系の影響が燃料健全性に及ぼす影響 ・底板の材質（摩擦係数）が転倒挙動に及ぼす影響

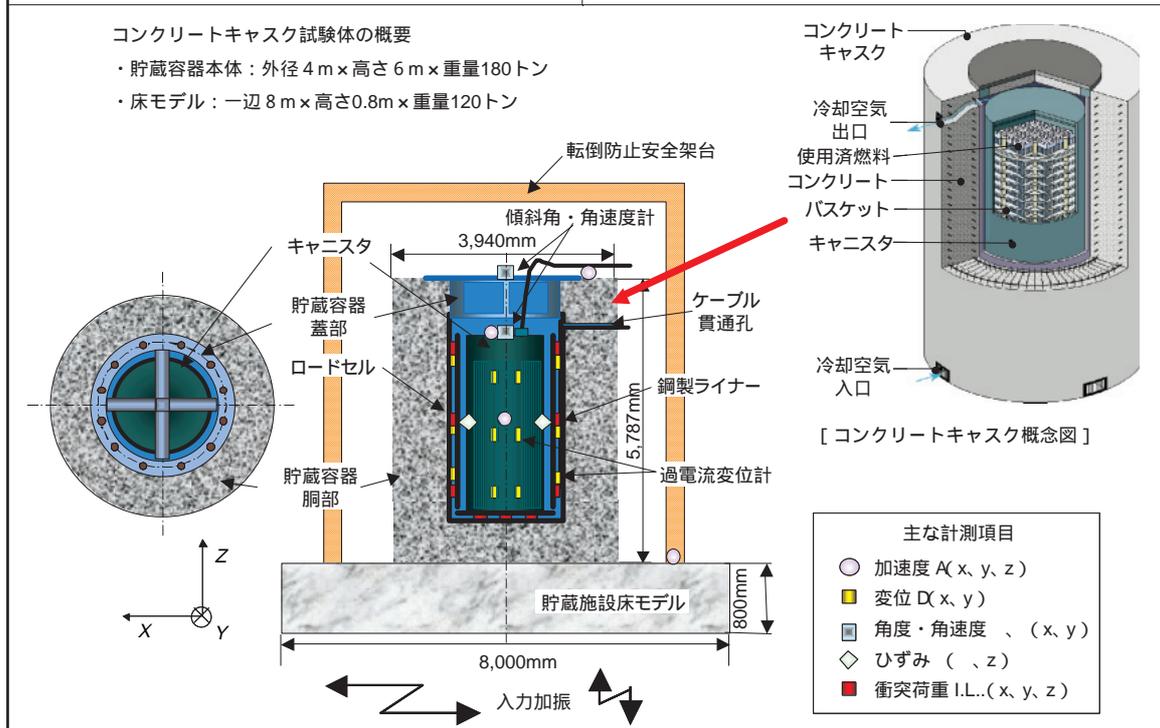


表7-3-2 試験条件

ケース	確認事項	ガタ (× : 無、 : 有)			燃料 体数	入 力		
		燃料 - バスケット	キャニスタ - 貯蔵容器 (又は床)	貯蔵容 器 - 床		波	方向	レベル (倍)
I	燃料集合体振動 特性試験		...	...	1*	ランダム波 正弦波 人工波 観測波	Y Y、Z X、Y、Z	1/2、2/3、1 1.4 (裕度確認)
II	摩擦特性試験	...	...	...	...	正弦波	Y	加速度一定
III	キャニスタ耐震試験 (浮上限界・転倒限界)			...	21	ランダム波 正弦波	Y Y、Z	1/2、2/3、1
IV V	コンクリートキャスク 耐震性評価 (浮上限界・固縛力)					人工波 観測波	X、Y、 Z	1/2、2/3、1 1.2 (裕度確認)

主な試験の実施項目は、下記のとおりである。

- I 燃料集合体振動特性試験
- II 摩擦特性試験
- III キャニスタ耐震試験 / 転倒試験
- IV コンクリート充填鋼板製キャスク耐震試験
- V 鉄筋コンクリート製キャスク耐震試験

(2) 測定項目

ガタ衝突時にキャスク各部に生じる加速度や、加震時における貯蔵容器やキャニスタのロッキング角速度や角度をジャイロセンサにより計測する。また、貯蔵容器内でのキャニスタのガタ衝突による衝撃力やすべり変位を測定するため、支持レールと支持板に、ロードセルや軸力ボルト、ならびに渦電流変位計を設置した。また、バスケットセル内にも渦電流変位計を設置し、バスケットセルと燃料集合体との相対距離を測定した。試験データの収録サンプリング周波数は2kHzである。

(3) 試験条件

表7-3-2に、試験条件を示す。加振波については、ランダム波(0.2～30Hz、40秒)、正弦波掃引(3.2Hz/minで10Hzから0.4Hzまでのスイープダウン)、観測地震波

(El Centro, JMA神戸)人工地震波とした。人工地震波は、「震源を事前に特定できない地震の考え方と地震動の策定について」(原安委：原子力発電耐震設計専門部会 地震・地震動WG)に基づき作成した。

7-3-5 今後の予定

図7-3-7に、試験の実施状況を示す。平成17年10月上旬に試験を終了する予定である。



図7-3-7 試験の実施状況