

# オーバーパック設計の考え方

## (研究報告)

1999年11月

核燃料サイクル開発機構  
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

核燃料サイクル開発機構 東海事業所

運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Information Section,

Administration Division,

Tokai Works,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1999

## オーバーパック設計の考え方

(研究報告)

報告者：本間信之，千葉恭彦\*，棚井憲治

### 要 旨

本報では、高レベル放射性廃棄物の地層処分の人工バリアを構成する要素のうち、オーバーパックについて、第2次とりまとめにおいて提示した炭素鋼オーバーパックの仕様例に対する設計の考え方を中心に、複合オーバーパックの概念の紹介も含め、設計要件、構造設計、製作性および検査性の観点から検討を行った結果を報告するものである。

まず、人工バリアの構成要素としてのオーバーパックに求められる設計要件および設計の前提条件をまとめた。候補となる炭素鋼材料については、一般に鍛鋼、鋳鋼、圧延鋼などが用いられるが、軽水炉の圧力容器等にも使用実績の豊富な鍛鋼を選定した。次に炭素鋼オーバーパックについて、処分後に想定される荷重条件の設定を行い、耐圧厚さを決定した。加えて、腐食量の検討から想定寿命期間中の腐食厚さを求め、さらに、腐食に影響を及ぼす地下水の放射線分解防止のためのガラス固化体からの放射線の遮へいに必要な厚さを検討したうえで、オーバーパックの必要板厚を求め、炭素鋼オーバーパックの仕様例として提示した。板厚は190 mmとなり、第1次取りまとめ時（平成3年）に設定した仕様と比較して、30%の低減となった。

また、オーバーパックを実際に製作し、操業時の利用に当たり考慮されるべきいくつかの点、すなわちガラス固化体の封入、本体および封入溶接部の検査、ハンドリング機構等について、現状の技術をベースに検討を行い、検討すべき課題の抽出と今後の見通しをまとめた。

複合オーバーパックの概念については、炭素鋼オーバーパックとの設計の考え方の相違点を中心に紹介した。

最後に、今後のオーバーパックの研究開発において検討されるべき課題およびその見通しをまとめた。

---

東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究Gr.

\* 現在 石川島播磨重工業株式会社 原子力事業部 容器設計部

November, 1999

## Design Concepts for Overpack

Nobuyuki HONMA, Takahiko CHIBA \*, Kenji TANAI

### Abstract

This paper reports on the design process for a carbon-steel overpack as a key component in the engineered barrier system of a deep geological repository described in the 2nd Progress Report. The results of the research and development regarding design requirements, configuration, manufacturing and inspection of overpack are also described. The concept of a composite overpack composed of two different materials is also considered.

First, the design requirements for an overpack and presume environmental and design conditions for a repository are provided. For a candidate material of carbon steel overpack, forging material is selected considering enough experience of using this material in nuclear power boilers and other components. Second, loading conditions after emplacement in a repository are set and the pressure-resistant thickness of overpack is calculated. The corrosion thickness to achieve an assigned 1000 year life time and the required thickness to prevent radiolysis of ground water which might enhance corrosion rate are also determined. As a result, the total required thickness of a carbon-steel overpack is conservatively estimated to 190 mm. This is a reduction of about 30% from the previous estimate provided in the 1st Progress Report.

Additional items that must be considered in manufacturing and operating overpacks (i.e. sealing of vitrified waste, examination of main body and sealing welding, mechanism of handling) are evaluated on the basis of current technology, specific future data needs are identified.

With respect to the concept of composite overpack (i.e., an outer vessel to provide corrosion-allowance or corrosion-resistant performance and an inner vessel to provide pressure-resistance), the differences in design concepts between the carbon-steel overpack and such composite overpacks are analyzed.

Future data needs and analytical capabilities with respect to overpacks are also summarized.

---

Barrier Performance Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

\* Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co. Ltd.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. オーバーパックの概念と設計要件 .....	3
2.1 基本要件および設計要件 .....	3
2.2 炭素鋼オーバーパックと複合オーバーパック .....	7
3. オーバーパック設計の前提条件 .....	8
3.1 荷重の設定 .....	8
3.2 オーバーパック材料の設定 .....	11
3.2.1 オーバーパック材料に対する要求事項 .....	11
3.2.2 候補材料の特徴 .....	13
3.2.3 炭素鋼オーバーパックの材料 .....	14
4. 炭素鋼オーバーパックの構造設計 .....	16
4.1 基本形状およびガラス固化体収容孔の寸法 .....	16
4.2 オーバーパックの厚さの検討 .....	21
4.2.1 耐圧厚さ .....	21
4.2.1.1 準拠する基準 .....	21
4.2.1.2 耐圧厚さの計算 .....	22
4.2.2 腐食厚さ .....	25
4.2.3 遮へい厚さ .....	28
4.2.4 オーバーパック厚さの設定 .....	33
4.2.5 偏圧の作用による影響の検討 .....	34
4.2.6 処分孔の変形の影響の検討 .....	36
4.3 製作性、施工性からの検討 .....	37
4.3.1 蓋と円筒胴の製作 .....	37
4.3.2 封入および検査 .....	38
4.3.3 ハンドリング .....	42
4.4 オーバーパック仕様例 .....	44
5. 複合オーバーパックの設計の考え方 .....	45
6. オーバーパックの品質管理 .....	48
7. 今後の検討課題 .....	49
参考文献 .....	51

## 図 目 次

図 1-1 人工バリアの概念	1
図 1-2 処分坑道仕様	2
図 2-1 オーバーパックのハンドリング工程	6
図 2-2 複合オーバーパックの概念	7
図 3-1 緩衝材厚さと緩衝材の圧密反力の関係	9
図 3-2 ガラス固化体キャニスターの概念	17
図 3-3 オーバーパックの構造案	19
図 4-1 平板板厚計算モデル	22
図 4-2 円筒胴板厚計算モデル	23
図 4-3 低溶存酸素濃度下での炭素鋼の平均腐食速度の経時変化	27
図 4-4 オーバーパック表面での吸収線量率	29
図 4-5 放射線分解により供給されるカソード電流密度	31
図 4-6 偏圧解析モデル	34
図 4-7 オーバーパックが過大に変形すると予想される荷重	35
図 4-8 炭素鋼オーバーパックの試作例	37
図 4-9 オーバーパックのハンドリング機構	42
図 4-10 炭素鋼オーバーパックの仕様例	44
図 5-1 試作したチタン-炭素鋼複合オーバーパックの外観	47
図 5-2 試作した銅製外容器の外観	47

## 表 目 次

表 2-1 オーバーパックに対する基本要件	3
表 2-2 オーバーパックの設計要件	4
表 3-1 オーバーパックに作用する荷重の組み合わせ	8
表 3-2 オーバーパックに作用する外圧値	10
表 3-3 オーバーパックの候補材料に対する要求事項	11
表 3-4 炭素鋼材料の検討	14
表 3-5 基本形状およびガラス固化体収容孔の寸法に対する要求事項	16
表 3-6 オーバーパック形状の比較評価	17
表 3-7 ガラス固化体仕様の概要	18
表 4-1 必要板厚計算結果	24
表 4-2 放射線遮へい 解析条件	28
表 4-3 炭素鋼オーバーパックの厚さ	33
表 4-4 封入、検査およびハンドリングの各方法に対する要求事項	38
表 4-5 封入方法としての適用性に関する比較評価	38
表 4-6 漏えい試験におけるサーチガスの導入方法案	41
表 4-7 ハンドリングの観点からのオーバーパックの形状案	42
表 6-1 オーバーパックの品質管理項目	48

## 1. はじめに

我が国では放射性廃棄物自体を加工して安定な形態としたガラス固化体、ガラス固化体を格納し封入する堅固な容器（オーバーパック）、地下に埋設する際にオーバーパックと岩盤の間に充填される緩衝材から構成される人工バリアが検討されている。

図1-1に人工バリアの概念を、図1-2に第2次とりまとめにおいて検討されている処分坑道仕様（処分孔縦置き定置方式および処分坑道横置き定置方式）を示す。

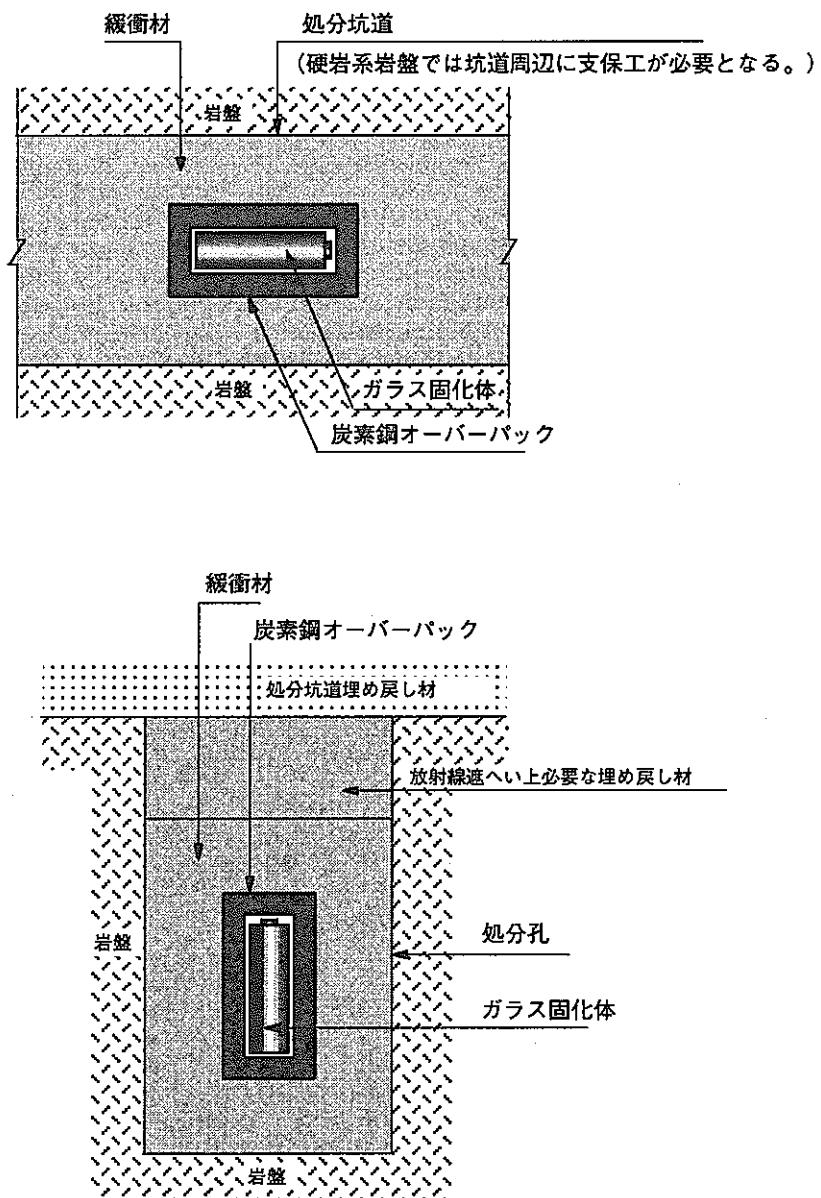


図1-1 人工バリアの概念

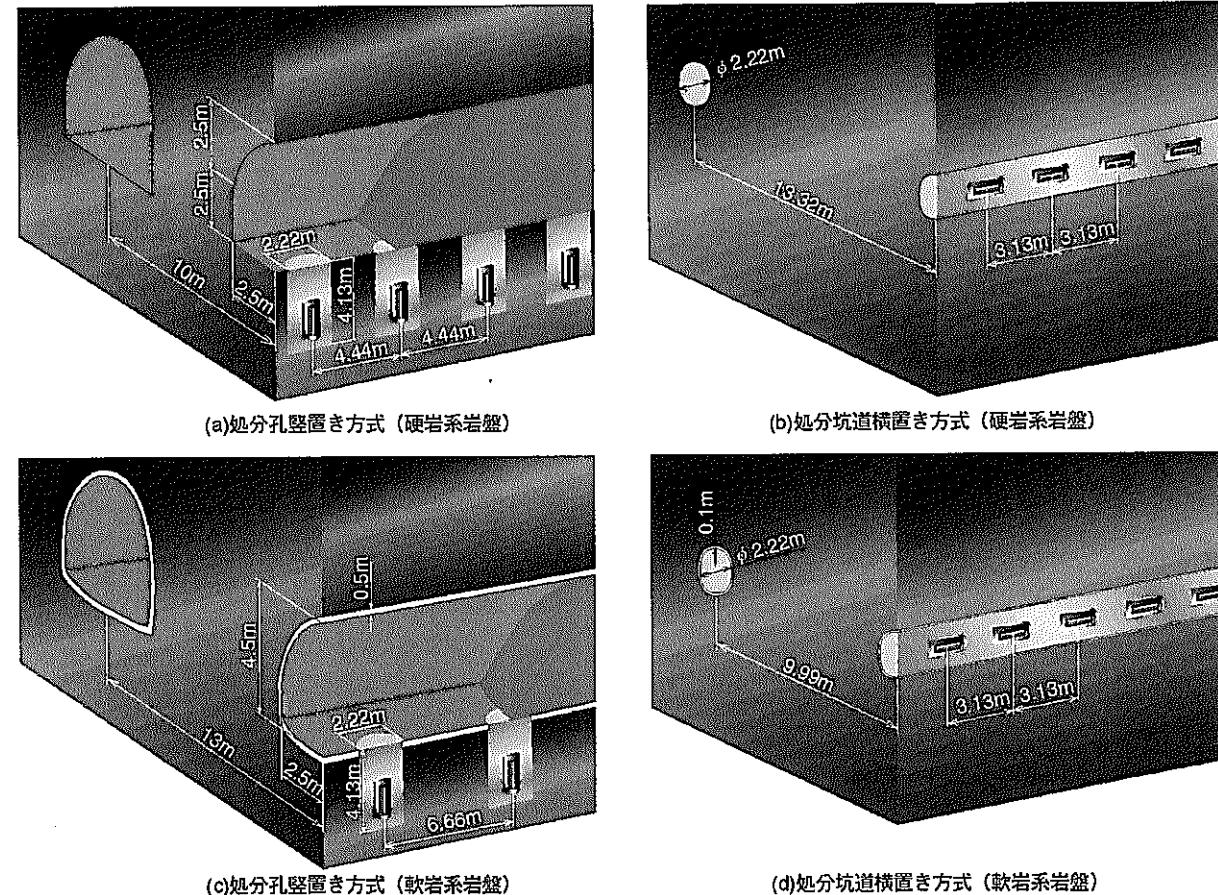


図 1-2 处分坑道仕様

## 2. オーバーパックの概念と設計要件

### 2.1 基本要件および設計要件

現状の地層処分のコンセプトにおいて、オーバーパックには、ガラス固化体の放射能がある程度減衰するとともに、周辺の環境が深部地下本来の還元性の条件に戻るまでの期間（埋設後1000年間とする）、放射性核種をその内部に閉じ込め地下環境から隔離することが求められている（放射性核種の閉じ込め）。具体的には、ガラス固化体に地下水を所定の期間接触させない機能が要求されている。また、人工バリアはオーバーパックだけでなく、ガラス固化体および緩衝材を含めた1つのシステムとして機能することから、ガラス固化体および緩衝材に有意な影響を与えないことが、人工バリアの成立のために必要となる。このほか、オーバーパックの製作・施工の技術的成立性についても十分考慮する必要がある。これらをオーバーパックに対する基本要件として表2-1に整理する。

表2-1 オーバーパックに対する基本要件

地層処分における安全確保のための要件	放射性核種の閉じ込め（ガラス固化体に地下水を所定の期間接触させない）
人工バリアが成立するための要件	他の人工バリア（ガラス固化体および緩衝材）に有意な影響を与えないこと 製作・施工が技術的に可能であること

上記の基本要件を満足するために、オーバーパックの設計において考慮すべき具体的な項目（設計要件）を表2-2に示す。以下では、表2-2に挙げた各項目について説明する。

#### (1) 「放射性核種の閉じ込め」に関する項目

「①閉じ込め性を有すること」とは、オーバーパックが貫通欠陥などのない密封構造を埋設前の段階で備えていることであり、ガラス固化体と地下水の接触回避機能を埋設後長期にわたり発揮するための前提条件となるものである。このことは、操業施設での核種漏洩による汚染や作業員の被ばくを回避するうえでも、重要と考えられる。これを満足するためには、溶接性の良好な材料と適切な溶接継手を選定して、信頼性の高い封入を行う必要がある。また、初期欠陥の発生が少なく組織が均一であることなど安定な材料品質も望まれる。さらに、閉じ込め性は最終的にガラス固化体封入後の検査によって担保されることから、オーバーパックの構造を定めるにあたっては、検査性について十分考慮する必要がある。

「②耐食性を有すること」とは、地下環境において想定される腐食の進展により、閉じ込め性を有するオーバーパックの構造が、所定の期間損なわれないようにすることであり、腐食に対する適切な対応が必要となる。オーバーパックの寿命は腐食によって決定されると考えられることから、深部地下環境における耐食性は、材料選定の最も重要な要件となる。

表 2-2 オーバーパックの設計要件

基本的な要件	機能・役割	設計上考慮すべき項目(設計要件)	内 容
放射性核種の隔離のための要件	ガラス固化体に地下水を所定の期間接触させないこと	①閉じ込め性を有すること	操業時に放射性物質の外部環境への漏出を防ぐこと／廃棄体埋設後、地下水の侵入を防ぐこと
		②耐食性を有すること	廃棄体埋設後、所定の期間、腐食によって閉じ込め性が損なわれないこと
		③耐圧性を有すること	埋設後作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持し、閉じ込め性を損なわないこと
		④放射線遮へい性を有すること	ガラス固化体からの放射線による水の放射線分解とともに生成される酸化性化学種により、腐食が促進されないこと
		⑤耐放射線性を有すること	ガラス固化体からの放射線によって、耐圧性が有意な影響を受けないこと
		⑥耐熱性を有すること	ガラス固化体からの発熱に対し、閉じ込め性、耐食性および耐圧性が有意な影響を受けないこと
人工バリアが成立するための要件	所定の期間、他の人工バリアに有意な影響を与えないこと	⑦十分な内空間を有すること	オーバーパックの変形やガラス固化体の熱膨張により、ガラス固化体が機械的に破損しないこと
		⑧良好な熱伝導性を有すること	ガラス固化体の発熱を外部に伝え、ガラス固化体の安定な形態を損なうような熱による変質を生じさせないこと
		⑨放射線遮へい性を有すること	ガラス固化体からの放射線によって、緩衝材の材料特性が変化しないこと
		⑩化学的緩衝性を有すること*1	周囲の地下水を腐食生成物によって還元性環境に緩和すること
製作・施工が技術的に可能であること		⑪製作性を有すること	既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術に基づいた構造であること
		⑫遠隔封入性を有すること*2	ガラス固化体の遠隔操作による封入が、既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術により、ガラス固化体の安定な形態を損なうことなく可能な構造であること
		⑬遠隔定位性を有すること*2	廃棄体の遠隔操作による定位が、既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術により、ガラス固化体の安定な形態を損なうことなく可能な構造であること

注) \*1: この特性を有していれば人工バリアの機能向上に寄与することが期待される特性。

\*2: これらを考慮することによって、放射線遮へい性に対する過度に保守的な要求を緩和できるため、オーバーパック厚さを減少させることが可能となり、その結果、緩衝材の機能に有意な影響を与えないことが期待できる要件。

「③ 耐圧性を有すること」とは、埋設後作用する緩衝材膨潤圧などの外力により、オーバーパックが機械的に破損して閉じ込め性が損なわれることのないよう、オーバーパックに適切な構造強度を持たせることであり、選定された材料、形状に対して適切な厚さを設定することで具体化される。厚さの合理化という意味では強度の高い材料、耐圧性の良い形状が望ましく、材料および基本形状の選定においても考慮が必要となる。

「④ 放射線遮へい性を有すること」とは、地下水の放射線分解により生成される酸化性化学種の影響により、材料によっては腐食作用が促進される可能性があることを考慮したものである。「②耐食性を有すること」に対して有意な影響を与える場合には、これを回避するだけの遮へい機能、すなわち材料の厚さが必要となる。

「⑤ 耐放射線性を有すること」とは、長期にわたる放射線の照射が、設計時に想定した材料特性にオーバーパックの機能発揮上有意となる変化を生じさせないようにすることである。想定すべき具体事象としては照射脆化が挙げられる。材料として放射線による照射脆化の感受性が低いものが望まれるほか、寿命末期での脆化の程度を予測し、「③ 耐圧性を有すること」に対して有意な影響とならないことを確認する必要がある。

「⑥ 耐熱性を有すること」とは、オーバーパックの閉じ込め性がガラス固化体の発熱により損なわれないようにすることである。オーバーパック材料の熱による変態や、熱応力の発生による破損を想定したものであり、埋設状態でのオーバーパックの最大上昇温度と関係する。しかし、現状の処分場の設計では、ガラス固化体や緩衝材の熱による変質を回避する観点から、廃棄体の埋設密度の設定などにおいて人工バリアの温度を適切に維持できるよう考慮される。

## (2) 「他の人工バリアに有意な影響を与えないこと」に関する項目

人工バリアは、オーバーパックだけでなくガラス固化体および緩衝材を含めた1つのシステムとして機能することから、オーバーパックの設計では、ガラス固化体および緩衝材の機能発揮に有意な影響を与えないように配慮する必要がある。

「⑦ 十分な内空間を有すること」とは、外力の作用によりオーバーパックが変形してオーバーパック内壁から伝えられる荷重や、オーバーパックの内壁により熱膨張を拘束されることで発生する応力などにより、ガラス固化体が破損しないようにすることであり、ガラス固化体収容孔の寸法（オーバーパック内壁とガラス固化体のクリアランス）の設定に関係するものである。実質的には外力によるオーバーパックの変形量およびガラス固化体の熱膨張量はきわめて僅かであるため、ガラス固化体収容孔の寸法は、後述する遠隔操作によるガラス固化体の挿入性の観点から決定されるものと考えられる。

「⑧ 良好的な熱伝導性を有すること」とは、ガラス固化体から発生する崩壊熱を人工バリア外に適切に放出し、人工バリアの温度をガラス固化体や緩衝材の熱による変質回避のための限度値以下に維持するため必要なものである。オーバーパック材料としては、金属などの熱伝導性の良好な材料が望まれる。

「⑨ 放射線遮へい性を有すること」とは、ガラス固化体からの放射線照射による緩衝材材料（ベントナイト）の性質変化を回避するためのものである。緩衝材としての止水性能や核種収着性能などに有意な低下が生じ得る場合には、オーバーパックの重要な設計要件となる。

現時点で性能評価上必ずしも必要とはされていないが、人工バリアの機能をさらに向上させるため、オーバーパックには「⑩ 化学的緩衝性を有すること」も期待される。これは、オーバーパックが破損後（設計寿命後）も自らの腐食によりガラス固化体周辺の地下水条件をより還元的にし、核種の溶解や移行を抑制することであり、これによって緩衝材に求められる核種移行遅延機能のさらなる向上が期待できる。この観点では、オーバーパック材料として炭素鋼のような腐食形態の材料を使用することが望まれる。

### (3) 「製作・施工が技術的に可能であること」に関する項目

製作・施工の技術的な可能性について考える場合、オーバーパックの製作から定置までの工程と作業環境に配慮する必要がある。図2-1に想定されるオーバーパックのハンドリング工程を示す。

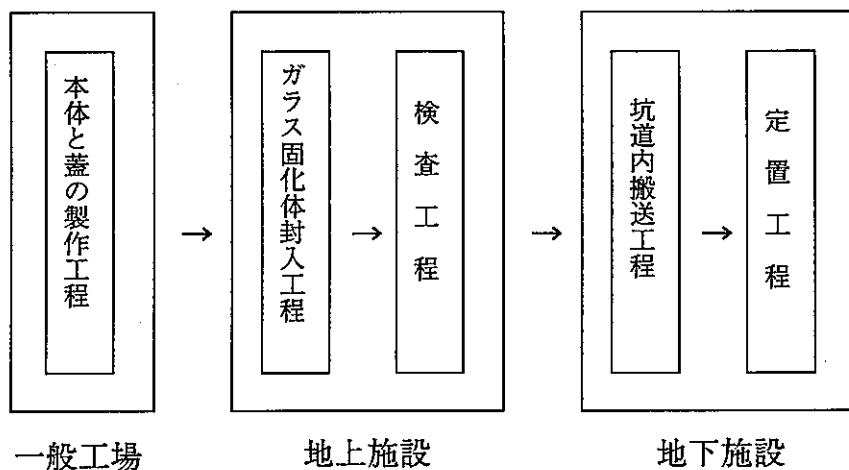


図2-1 オーバーパックのハンドリング工程

オーバーパックは、基本的に本体と蓋の2つの部材から構成され、これらはそれぞれ一般工場において製作された後、処分場の地上施設に搬送されるものと考えられる。したがって、「⑪ 製作性を有すること」は、一般工場において、オーバーパック各部材の製作が可能であることを意味し、圧力容器などの現状の製作技術レベルを十分に考慮する必要がある。

地層処分場の地上施設では、本体にガラス固化体が挿入された状態で蓋が溶接され、その後溶接部の検査が行われる。「⑫ 遠隔封入性を有すること」は、蓋の溶接および溶接部の検査が、オーバーパックにガラス固化体を挿入した後の作業となることから生じる要件である。候補技術の選定においては、放射線環境下での遠隔自動化の可否が重要となるほか、ガラス固化体に有意な熱影響を与えない配慮が必要となる。また、ガラス固化体の挿入性の観点から、適切な内空間（ガラス固化体収容孔の寸法）を確保することも求められる。

地上施設での検査に合格したオーバーパックは地下に搬送され緩衝材とともに地下坑道内の所定の位置に定置される。「⑬ 遠隔定置性を有すること」は、地上施設における蓋の溶接作業などと同様に、放射線環境下での搬送および定置作業に対して遠隔自動化を要求するものである。搬送や定置に関する設備の機構として、オーバーパックの確実な把持が可能な方式を採用するとともに、この機構に適したオーバーパックの構造設定が必要となる。また、地下坑道という狭い空間での作業となることや周囲への緩衝材定置の容易さの観点から、コンパクトで単純な、安定性のある形状および構造が望まれる。

## 2.2 炭素鋼オーバーパックと複合オーバーパック

前記 2.1において検討された耐食性に対して、单一構造のオーバーパックの他に、以下の図 2-2 に示すような外面を耐食性材料で被覆した複合構造のオーバーパックが検討されている（本間ほか 1999a, 1999b）。本検討においては炭素鋼を材料とする单一構造のオーバーパックについて、その設計検討と考え方を報告する。

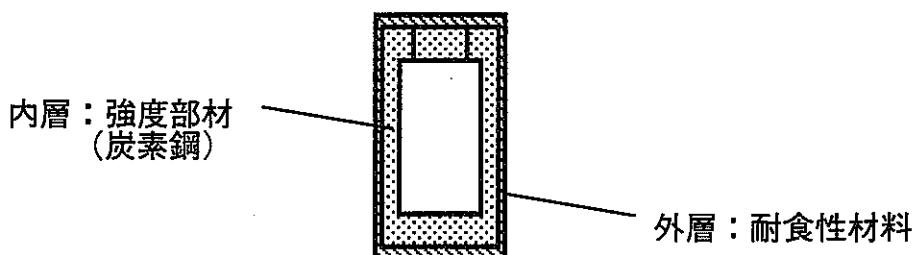


図 2-2 複合オーバーパックの概念

### 3. オーバーパック設計の前提条件

#### 3.1 荷重の設定

埋設後のオーバーパックには、地下水の飽和にともない、周囲に施工された緩衝材の膨潤圧や静水圧が作用し、さらに岩盤のクリープ変形やオーバーパックの腐食膨張によって緩衝材が圧密されることにより発生する反力（以下、「圧密反力」という）が作用するものと考えられる。地下水とガラス固化体の接触回避機能を維持するため、オーバーパックにはこれらの外荷重の作用により破損しないような構造的強度が要求される。

##### (1) オーバーパックに作用する外荷重と耐圧厚さ

オーバーパックの緩衝材や岩盤との力学的相互作用を、設計上、硬岩系岩盤（結晶質岩）と軟岩系岩盤（堆積岩）のそれぞれの埋設ケースについて表3-1のように設定する。

表3-1 オーバーパックに作用する荷重の組み合わせ

荷重の組み合わせ	
硬岩系岩盤 (深度 1000 m)	[地下水静水圧] + [オーバーパックの腐食膨張により生じる緩衝材の圧密反力（緩衝材の膨潤応力含む）]
軟岩系岩盤 (深度 500 m)	[地下水静水圧] + [岩盤クリープ変形により生じる緩衝材の圧密反力] + [岩盤クリープ終了後、オーバーパックの腐食膨張により生じる緩衝材の圧密反力の増加分（緩衝材の膨潤応力含む）]

ここで、硬岩系岩盤においては、オーバーパックの設計寿命である1000年間の岩盤クリープ変形量は、今回評価した結果では微小と考えられるため、実質的に地圧は作用しないものと考えた（高治ほか、1999）。一方、軟岩系岩盤においては、岩盤のクリープ変形はオーバーパックの腐食膨張が始まる前に緩衝材の圧密反力と均衡するまで進行する、もしくは緩衝材が想定される岩盤のクリープ変形量分、圧密されるとする考え方を採用した。なお、岩盤クリープ挙動に関しては、長期的に取得されたデータが少なく、その評価方法も完全に確立されたものと考えることは現状では困難であり、今後さらなる研究が必要である。また、表3-1に示した荷重の組み合わせの考え方は暫定的なものであり、今後、そのばらつきや想定外の事象がないことなどを慎重に確認していくことが望まれる。

これらの荷重のうち地下水静水圧は、想定する岩盤および深度が決まれば1つの値として決定される。

処分深度は硬岩系岩盤については1000m、軟岩系岩盤については500mとする。

一方、岩盤クリープやオーバーパックの腐食膨張により生じる緩衝材の圧密反力（以下、「腐食生成物膨張圧」という）は、岩盤のクリープ変形量、緩衝材の厚さ、圧密特性、オーバーパックの寸法に応じて変化する。そこで、第2次とりまとめ設定された緩衝材の材料仕様例（ベントナイト70wt%，ケイ砂30wt%，密度1.6Mg/m<sup>3</sup>）に対して、その圧密試験（高治・鈴木，1999）から導かれた間隙比（e）と有効応力（P）の関係（ $e = (P=1 \text{ のときの間隙比}) - C_c \times \log P$ 、ここで  $C_c$  は圧縮指数）に基づき、岩盤クリープ変形後および腐食膨張後の緩衝材の間隙比から緩衝材の圧密反力を求ることとした。緩衝材の厚さとオーバーパックの厚さの関数として、緩衝材の圧密反力を繰り返し計算により求めると、緩衝材の圧密反力と緩衝材の厚さの関係は図3-1のようになる。なお、ここでは、軟岩系岩盤の岩盤クリープ変形量は、岩盤クリープの解析結果（1000年間で15.4mm）（高治ほか，1999）を参考に20mmと想定した。

オーバーパックの腐食膨張については、耐用年数1000年間で腐食代40mm（4.2.2参照）がすべて腐食するものとし、鉄筋コンクリート構造物の腐食ひびわれに関する文献（須田ほか，1992）を参考に、腐食部の腐食後の体積は腐食前の3倍に膨張すると仮定した。また、緩衝材はオーバーパック周り全方向に均一な厚さで設置され、保守的にその周りは完全に固定されているものとした。人工バリアの定置方法によっては緩衝材厚さを半径方向と軸方向で変えるような選択もあり得るが、ここでは最も基本的な考え方として全方向均一な厚さとしている。

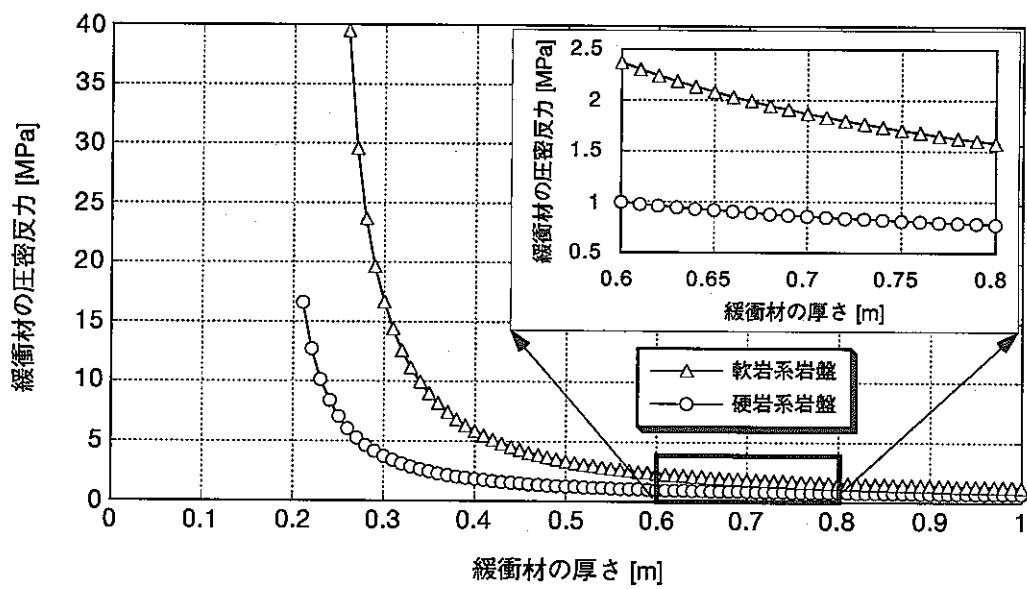


図3-1 緩衝材厚さと緩衝材の圧密反力の関係

ここで緩衝材の厚さについて、応力緩衝機能および緩衝材製作コストの観点から40cm以上70cm未満であれば合理的であるとされ、本検討では緩衝材厚さを70cmと設定した。（杉野ほか，1999）

厚さ 70 cm における緩衝材の圧密反力を図 3-1 により求めると、硬岩系岩盤においては 0.86 MPa、軟岩系岩盤では 1.87 MPa となる。

以上から、緩衝材厚さ 70 cm の場合にオーバーパックに作用する外圧は表 3-2 に示す値となる。

表 3-2 オーバーパックに作用する外圧値

	作用外圧値 [MPa]	
	硬岩系岩盤 (深度 1000m)	軟岩系岩盤 (深度 500m)
地下水静水圧	9.80	4.90
岩盤のクリープ変形および腐食生成物膨潤圧による緩衝材の圧密反力	0.86 (岩盤クリープは考慮しない)	1.87
合 計	10.7	6.8

### 3.2 オーバーパック材料の設定

#### 3.2.1 オーバーパック材料に対する要求事項

前項で記述した要求事項のうち、候補材料の選定に関する項目を抽出して整理すると、表 3-3 のようになる。

表 3-3 オーバーパックの候補材料に対する要求事項

要求事項	重要度
人工バリアの機能発揮に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> <li>・処分環境において優れた耐食性が期待できること</li> <li>・機械的強度が高いこと</li> <li>・線吸収係数が高いこと</li> <li>・放射線照射脆化の感受性が低いこと</li> <li>・品質に対する信頼性が高いこと</li> </ul>
製作・施工の成立に関するもの	<ul style="list-style-type: none"> <li>・溶接性が良好なこと</li> <li>・成形加工性が良好なこと</li> </ul>

[凡例] ◎: 機能の発揮または製作・施工の成立を決定づけ、とくに重要なものの

○: 機能の発揮または製作・施工の成立に重要なもの

●: 合理的な仕様設定のために望ましいもの

オーバーパックによる放射性核種の閉じ込め機能は、オーバーパックが破損・貫通することにより失われることから、オーバーパックの寿命は埋設から破損・貫通に至るまでの期間である。過剰な負荷荷重による機械的な破損・貫通は、適切な設計、製作および検査がなされることにより回避が可能であることから、オーバーパックの成立の可否は、まず第一に腐食により決定されるものと考えられる。したがって、候補材料の選定においては、材料のもつ耐食性が最も重要な要件となる。この観点では、これまでの検討において、炭素鋼、チタン、銅、ニッケル基合金、高ニッケル合金、およびステンレス鋼などが候補になり得る材料であるとして評価してきた。これらはその腐食挙動の違いから準耐食性金属 (Corrosion Allowance Type) と高耐食性金属 (Corrosion Resistant Type) に分類されている (石川ほか, 1992)。

準耐食性金属は、ある程度の速度で腐食するが、局部腐食化の傾向が小さいという特徴を有する。炭素鋼や銅はこの準耐食性金属に分類される。これらの材料をオーバーパック材料として用いる場合には、ある程度腐食することを前提として、腐食速度に基づいた耐用期間中の腐食量を評価し、適切な腐食代を設定することが重要となる。一方、高耐食性金属は、金属表面に高耐食性の不動態被膜を形成する。この不動態被膜が健全な限りほとんど腐食しない。チタン、ニッケル基合金、高ニッケル合金およびステンレス鋼は、この高耐食性金属に分類される。これらの金属で問題となるのは、孔食やすきま腐食などの局部腐食である。高耐食性金属の特徴を生かすためには、局部腐食の起こらない条件でこれらの材料を使用することが重要である。したがって、局部腐食の発生臨界条件を把握することが課題となる。

これらの材料のうち炭素鋼は、構造材や放射線の遮へい材として十分な使用実績を有し、設計データの充実や成形加工技術の確立といった点において、表 3-3 に示した耐食性以外の項目に対しても有望と考えられる。信頼性の高い腐食評価の結果として合理的な厚さの腐食代を設定し得る場合には、単一材料による単純で経済的なオーバーパックの構造設計が可能となることから、ここでは第一に検討すべき材料として取り挙げた。

炭素鋼と同じ準耐食性金属に分類される銅は、機械的性質が炭素鋼に比べ劣るもの、考古学的出土品の例にも見られるように、その貴金属的な性質から還元性である処分環境において優れた耐食性を発揮し得るため、これも検討対象の 1 つとして取り挙げた。ただし、後述のとおり、酸化剤の存在しない水中において熱力学的な安定性に非常に優れた点を有する銅にあっては、熱力学的に水の中で不安定な金属と合金化することは、たとえ合金化により短期的な腐食速度の低下が得られたとしても、バルクの金属としては熱力学的安定性を失うことになり望ましくないと考えられることから、ここでは純銅のみを対象とした。

一方、高耐食性金属については、耐すきま腐食性の観点から、チタン（低合金チタンを含む）を優先的な検討対象として取り挙げた。チタン合金は、六方最密充填構造の  $\alpha$  単相、あるいはこの  $\alpha$  相にわずかに体心立方構造の  $\beta$  相を含む準  $\alpha$  相の組織を有するものと、合金元素が固溶した  $\alpha$ - $\beta$  相、あるいは  $\beta$  単相の組織を有するものとに大別できる。主に、前者は耐食性が優先的に要求される部位に使用されるのに対し、後者は強度（比強度）が優先的に要求される航空機材料などとして使用される。オーバーパックに要求されるのはまず耐食性であることから、前者のみを検討の対象とした。前者のチタン合金は、後者と区別して低合金チタンと呼ばれる。以下、とくに断わらないで使用する場合には、チタンという呼称は工業用純チタンと低合金チタンを指すものとする。

これらの材料は、処分コンセプトがわが国と大きく異なる米国およびドイツを除いた諸外国においても、たとえばスイスは炭素鋼、スウェーデン、フィンランドは銅、カナダはチタンと銅というように、オーバーパックの候補材料として検討されている。

炭素鋼、チタンおよび銅には、次項に示すとおりそれぞれ得失があり、処分場の候補地が決定されていない現時点において、いずれの材料が最も優れているとは言い難い。当面はこれらの材料について平行して研究を進めるとともに、必要に応じて他の材料も検討対象に加え、サイトが決定された段階で候補材料を絞り込むことが合理的と考えられる。

### 3.2.2 候補材料の特徴

#### (1) 炭素鋼

準耐食性金属に分類される炭素鋼には、自らの腐食の進展により酸化剤を消費して、オーバーパックの周囲に、核種移行の場として有利な還元性の環境をもたらす効果が期待できる。また、前述のとおり、現実的な厚さで十分な腐食寿命を達成することができれば、単一材料による単純な構造設計が可能となる。したがって、後述する異種金属材料の接触にともなうガルバニック対形成などの影響も評価上考慮する必要がない。しかし、一般的に銅と比較して天然水環境での腐食速度は大きく、またチタンが不動態を維持して腐食しない環境においてもある程度の速度で腐食する。

#### (2) チタン

チタンの不動態は、天然環境に存在する不動態破壊型の陰イオンのうち最も一般的な塩化物イオンに対して最も高い耐食性を示すものの1つである。しかし、ひとたび不動態が局所的に破壊され再不動態化しなければ、孔食やすきま腐食などとして成長し、アノードサイトが局所的に侵食される。皮膜の安定性も含め、還元性条件でのチタンの腐食挙動には不明な点もあり、人類の使用の歴史が浅い材料であるがゆえに、長期の腐食事例の経験や使用経験の蓄積も炭素鋼や銅と比較して劣る。また、チタンは不動態保持電流密度が非常に小さいため、周辺の酸化剤を消費して還元性環境をもたらす機能は炭素鋼と比較して弱いと考えられる。

チタンは100°C以下では軟鋼と同等以上の機械的強度を有するが、高価であるため、強度部材として大量に使用することは合理的でない。したがって、オーバーパック材としてチタンを使用する場合には、内側に強度支持部材として別の材料を与えるのが望ましいと考えられる。この場合、内側の材料として炭素鋼を使用すれば、チタン外殻の貫通後に周辺環境に対し炭素鋼による還元作用を期待できる可能性がある。しかしながら、異種金属の接触にともなうガルバニック対形成によりニアフィールドの状況を複雑にする（たとえば局所的なpHの低下や水素ガス発生の加速など）可能性もある。これは、チタンと炭素鋼が絶縁されれば問題とはならないが、長期的に接触しないことを保証することには困難がともなう。

#### (3) 銅

炭素鋼と同じ準耐食性金属に分類される銅を、オーバーパック材として特徴づけるのは、その貴金属的性質である。 $Cu/Cu_2O$ の安定境界の酸化還元電位は、電位-pH図上で水素線より貴であるから（Pourbaix, 1966），実質的に水や水素イオンは、中性の地下水では酸化剤として働くかない。すなわち、酸素などの酸化剤の存在しない水の中では熱力学的に安定であると言える。地下深部の本来の環境は還元性であることから、初期の酸化性の期間を貫通することなく経過できれば、銅には非常に長い腐食寿命が期待できる。ただし、硫化水素や硫化物イオンの存在する環境では、この貴金属的な性質

が失われる。さらに、銅自体が貴な金属であるがゆえに、炭素鋼と比較して還元性の環境をもたらす機能は劣る可能性がある。

銅は機械的性質が炭素鋼やチタンと比較して劣る。したがって、銅をオーバーパック材料として用いる場合にも、チタンと同様に強度支持部材として内側に炭素鋼などの材料を与えるのが合理的と考えられる。この場合も、外殻貫通後に周辺環境に対し炭素鋼による還元作用を期待できる可能性はあるが、ガルバニック対形成などの影響を評価上考慮する必要が生じる。

### 3.2.3 炭素鋼オーバーパックの材料

本報では炭素鋼オーバーパックの仕様例を検討する。したがって、ここでは候補となる炭素鋼材料の検討を行う。

炭素鋼にはその使用用途に応じて、鋳鉄、鋳鋼、鍛鋼、圧延鋼材と様々な加工形態が存在するが、これらを上記の要求内容について比較し、オーバーパック材料として最適な材質を選択する。これらの比較を表 3-4 に示す。

表 3-4 炭素鋼材料の検討

	耐圧性	遮へい性	溶接性	成形加工性	機械的強度	組成均一性	検査性	コスト	評価
鋳 鉄	△	○	×	○	△	△	×	低い	×
鋳 鋼	△	○	△	○	△	△	△	低い	×
鍛 鋼	○	○	○	○	○	○	○	高い	○
圧延鋼材	○	○	○	×	○	○	△	中間	×

以上の検討から、鋳鉄、鋳鋼とも構造強度については材質の選択によって鍛鋼とはほぼ同様であり、耐圧設計上の問題はない。しかし製作時（鋳造時）に引き巣や砂かみといった欠陥が介在しやすい。これに対して鍛鋼は製作時の鍛練工程によって金属組織中に内在するに欠陥をより少なくできる。したがって、炭素鋼オーバーパックに用いる材料としては、コストは比較的高くなるものの、他の全ての項目に優れた特性を示す鍛鋼品を候補材料として考える。

鍛鋼品のうち、今回の試作に用いる具体的な材質については、JIS 規格に規定される各種の鍛鋼品から選択することとした。JIS に規定される鍛鋼品の中から、原子力関連製品などでも使用実績のある以下の鍛鋼品のうち、オーバーパックの材料として適する具体的材質を選定する。

- ① JIS G 3201 炭素鋼鍛鋼品 (SF)
- ② JIS G 3202 圧力容器用炭素鋼鍛鋼品 (SFVC)
- ③ JIS G 3206 高温圧力容器用 Cr-Mo 鋼鍛鋼品 (SFVCM)

これらの鍛鋼品について、前述と同様にオーバーパック材料に要求される項目を比較したが、いずれの鍛鋼品とも、耐圧性、遮へい性、成形性、加工性等は優れており差が見られない。

強度とコストのバランスという観点では、①の炭素鋼鍛鋼品 (SF 材) のうち SF490A 等がオーバーパック材料としての適性を備えていると思われる。

SF 材の炭素含有量は JIS 規格では 0.6wt% 以下とされている。従来の知見から、含有炭素量は材料の硬さに影響を及ぼすため、材料の溶接性向上（主に溶接後の割れ対策）のためには、炭素の含有量は 0.3wt% 以下とすることが望ましいとされ、SF 材をオーバーパック材料として用いる際には炭素含有量を 0.3wt% 以下に成分調整を行う必要が出てくる可能性がある。こうした規格外の成分調整は材料コストの増大につながる。

そこで本検討では、規格上含有炭素量が 0.3wt% 以下と SF 材より低含有量であり、割れに対する感受性が相対的に低い②の圧力容器用炭素鋼鍛鋼品 (SFVC 材) の中から、SFVC1 を炭素鋼オーバーパックの候補材料として選択し、構造設計を行うものとする。

#### 4. 炭素鋼オーバーパックの構造設計

2.で述べたように、炭素鋼、チタンおよび銅を考える場合、オーバーパックの構造概念としては、炭素鋼単一構造のもの（炭素鋼オーバーパック）と、チタンや銅の内側に、強度支持部材としての炭素鋼を配した多重構造のもの（複合オーバーパック）が合理的と考えられる。本検討では、これらのうち構造的に最も基本となる炭素鋼オーバーパックについて設計検討を行った。

複合オーバーパックについては、チタンや銅と炭素鋼との併用に関する構造的な可能性について試作を通じた検討を行っている（本間ほか 1999a, 1999b）。

##### 4.1 基本形状およびガラス固化体収容孔の寸法

###### (1) 要求事項

2.で記述した要求事項のうち、オーバーパックの基本形状およびガラス固化体収容孔の寸法に関する項目を抽出して整理すると表 3-5 のようになる。

表 3-5 基本形状およびガラス固化体収容孔の寸法に対する要求事項

仕様項目	要求事項		重要度
基本形状	人工バリアの機能発揮に関するもの	・耐圧構造として適したものであること	●
	製作・施工の成立に関するもの	・製作が容易であること（量産に適していること） ・コンパクトであること（ガラス固化体の大きさに対し過剰に大きくならないこと） ・緩衝材の定置が容易であること ・ハンドリングが容易であること	○ ○ ○ ○
ガラス固化体収容孔の寸法	人工バリアの機能発揮に関するもの	—	—
	製作・施工の成立に関するもの	・ガラス固化体の遠隔操作による挿入作業が可能であること	○

[凡例] ○：機能の発揮または製作・施工の成立を決定づけ、とくに重要なもの

○：機能の発揮または製作・施工の成立に重要なもの

●：合理的な仕様設定のために望ましいもの

## (1) 基本形状

オーバーパックの基本形状は、搬送や定置に関する作業の成立性に大きな影響を与えることから、まずこれについて考慮する必要がある。具体的には搬送や定置作業が狭い坑道内での作業となることから、収容するガラス固化体の大きさに対して過剰に大きくなる形状は適切ではない。これは処分場全体の規模縮小の観点からも重要となる。また、周囲への緩衝材の定置という観点から極力単純な形状が必要となり、さらにハンドリングの観点では仮置き時などの安定性も望まれる。このほか、設計の信頼性を高めるためには、外圧を受ける容器としてより適切な形状を選択することも必要となる。以上の観点において、考えられるいくつかの形状に対して定性的な比較評価を行うと表3-6のようになる。また、ガラス固化体キャニスターの概念を図3-2に、仕様の詳細を表3-7にそれぞれ示す。

表3-6 オーバーパック形状の比較評価

評価項目	人工バリアの機能発揮に関するもの	製作・施工の成立に関するもの			
		耐圧用途への適性	製作の容易性	コンパクト化の可能性	緩衝材定置の容易性
形状					
円筒形	○	○	○	△	△
球形	○	×	×	×	×
角柱形	×	△	△	○	○

[凡例] ○:特に良い、△:良い、×:問題あり

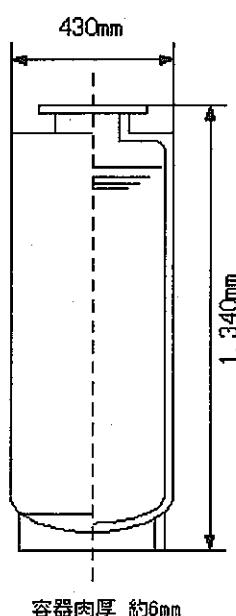


図3-2 ガラス固化体キャニスターの概念

表 3-7 ガラス固化体仕様の概要

主な諸元		
再処理工場		JNFL
濃縮度		4.5%
燃焼度		45000MWD／MTU
重量		約 500kg／本
寸法	外径	約 430 mm
	高さ	約 1340 mm
	容器板厚	約 6 mm
発熱量		約 2.3kw／本
材質	固化ガラス	ほうけい酸ガラス
	容器	ステンレス鋼

円筒形は、収容するガラス固化体の形状が直径 430 mm、高さ 1340 mm の円筒形であることから、オーバーパックの基本形状として合理的な形状の 1 つと考えられる。球形は一般に耐圧性の良好な形状であるが、そのハンドリングが比較的困難となるほか、オーバーパックの大きさが他の形状を採用した場合と比較して非常に大きくなる。角柱形は緩衝材の定置が最も簡単と考えられる形状でありハンドリングも容易であるが、円筒形に比べ耐圧性に劣るほか、製作においても合理性に欠ける面がある。

円筒形の場合、端部については、平らな形状のもののはかに、スイス (Nagra, 1993)において検討されているような半球形やさら型などの鏡形状も考えられる。一般に、これら鏡板を有する形状は耐圧性に優れるが、現在想定されるオーバーパックの半径と板厚の寸法比においては、球形を採用することによる板厚低減の利点は小さい (電力中央研究所・電気事業連合会, 1999)。また、オーバーパックが大量に生産されるものであることから、製作効率の点では平らな形状の場合と比べて大きく劣ると考えられる。

以上を踏まえ、オーバーパックの基本形状として、端部の平らな単純円筒形を選定する。

## (2) ガラス固化体収容孔の寸法設定

ガラス固化体収容孔の寸法設定では、以下の点を考慮する必要がある。

- ① 収容するガラス固化体の寸法、製作精度
- ② ガラス固化体の熱膨張量
- ③ ガラス固化体の遠隔操作による挿入作業性

ここでは、六ヶ所再処理工場から発生するガラス固化体と返還固化体（共に外径；430 mm、高さ；1340 mm）を想定した。寸法、製作精度については、公差を限りなく小さくすることは可能であるが、製作コストが高くなるため合理的でない。また熱膨張量については、試計算では直徑方向に 0.91 mm、軸方向に 2.82 mm という結果が出ており、この値以上で、挿入作業等に支障のないよう、ある程度余裕を持った値、すなわち直徑方向に片側 5 mm、軸方向に 10 mm のクリアランスを設定する。

したがって、ガラス固化体収容孔の寸法を直徑 440 mm、深さ 1350 mm と設定する。

## (3) 蓋部の形状および部材分割

前述の通り、複合オーバーパックの形状は円柱形とする。ここでは基本的な蓋の形状、オーバーパック本体の部材分割形式の検討を行う。オーバーパックに想定される構造案を以下の図 3-3 に示す。

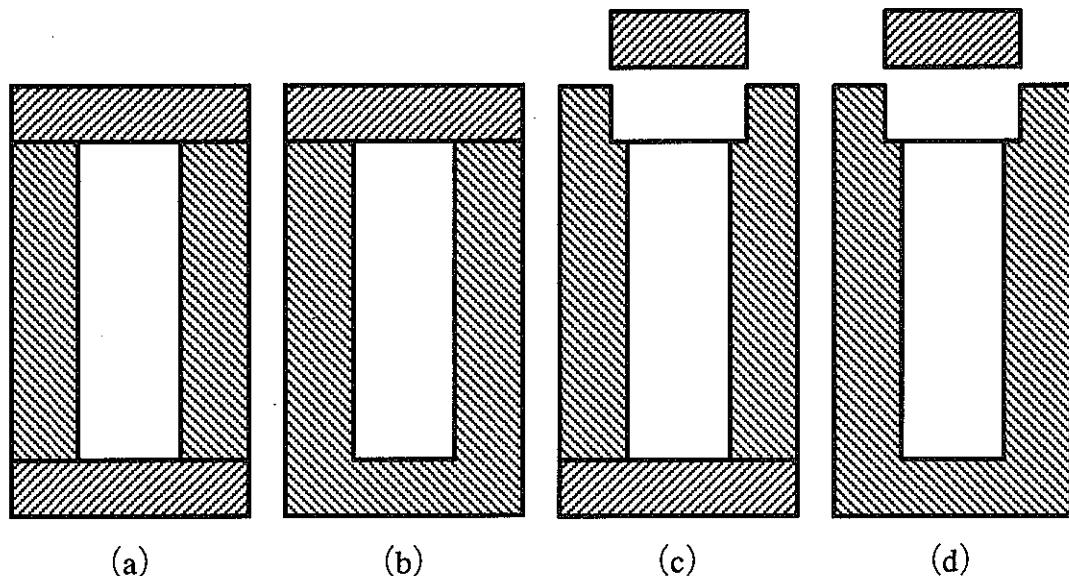


図 3-3 オーバーパックの構造案

蓋の形状については、本体への取り付け溶接の方式によって定まると考えられる。ガラス固化体収納後に実施されるオーバーパック本体への取り付け溶接は、固化体から発せられる放射線環境下での作業であり、溶接性および溶接後の検査性などを考慮すると、溶接線の長さはなるべく短くなる構造、すなわち図の(c), (d)に示す形状のとおり、オーバーパック本体の外径より小さい直徑の蓋とすることが、(a), (b)に比較して有利である。また、オーバーパック本体の円筒部、底部の部材分割については、溶接、検査のコストを考慮すると、なるべく溶接個所が少なくなるようにすることが望ましい。

これらを考慮し、本検討においては、図の(d)に示すような、円筒部と底部を一体型とし、円筒部上部に段付部を設けて蓋と取り合う構造を候補として採用する。

## 4.2 オーバーパックの厚さの検討

### 4.2.1 耐圧厚さ

#### 4.2.1.1 準拠する基準

現状オーバーパックの設計・解析に関する法規および技術基準は存在しない。したがって、現状では安全上の観点から、原子力発電設備用に制定された「発電用原子力設備に関する技術基準」（通産省告示第 501 号：以下告示 501 号）に準じて設計・解析を行うことが妥当と考えられる。

告示 501 号では、容器に関しては、第 1 種容器から第 4 種容器まで区分される。告示 501 号に準じたオーバーパックの設計および解析にあたっては、オーバーパックの法規上の機器分類を明らかにする必要がある。

オーバーパックは原子炉のように加圧された液体やガスが充填されておらず、かつ原子炉そのものでもないため、第 1 種容器の要件である、原子炉圧力容器冷却材バウンダリを構成する機器には該当せず、第 2 種容器の要件である、原子炉格納容器およびこれに接続する容器にも該当しない。また第 3 種容器の要件である、原子炉を安全に停止するために必要な設備または非常時に安全を確保する設備にも該当しない。このように、厳密に告示 501 号を解釈すると、上記 3 つのいずれにも該当しないグループである第 4 種容器に区分されることになる。

一方、告示には第 2 種容器の機能として放射性物質等の有害な物質の漏えいを防止するためのものと規定されており、高レベル放射性廃棄物を内包するオーバーパックは、原子炉格納容器でないもののその機能は本要件に該当するため、これを踏まえてオーバーパックを第 2 種容器と解釈し、これに準じた設計を実施することとした。

#### 4.2.1.2 耐圧厚さの計算

3.において設定した以下の外荷重値に基づき、オーバーパックの耐圧厚さを計算する。

- ・処分条件 硬岩系岩盤：1000m  
軟岩系岩盤：500m
- ・設計温度 : 150°C
- ・外荷重値（外圧値） 硬岩系岩盤：10.7 MPa  
軟岩系岩盤：6.8 MPa
- ・オーバーパック材料：SFVC1

設計温度については、オーバーパック周囲に施工される緩衝材の、オーバーパックからの発熱による変質防止のための、オーバーパックと緩衝材の境界における温度の制限値100°Cに対して、保守的に設定した値である。

これらの条件のもとでの、容器の平板部（蓋部、底部）および円筒胴部の板厚を告示501号に基づいて計算した。

##### (1) 平板の板厚（底部、蓋部）

告示501号第24条より、第2種容器の平板の必要板厚は以下の式による。

$$t = d \sqrt{\frac{KP}{S}} \quad (4-1)$$

ここに、

$t$ ：必要板厚

$d$ ：平板の直径

$P$ ：最高使用圧力（外荷重値）

$S$ ：許容応力

$K$ ：平板の取り付け方法による係数（第24条より）

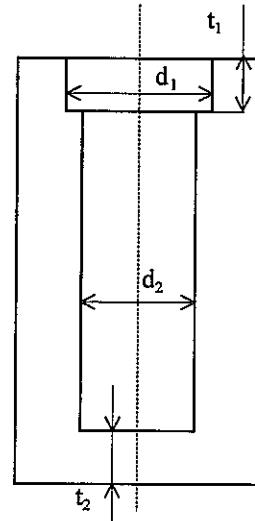


図4-1 平板板厚計算モデル

ここで許容応力  $S$ については、告示第24条では、告示別表第4に規定される当該材料の許容引張応力とされている。しかし、告示別表第4にはSFVC1が記載されていないため、別表第4の「備考6」にある、本表に記載されない材料に対する許容引張応力の計算法に従い、JIS G 3202に規定されているSFVC1の最小引張強さ410 N/mm<sup>2</sup>に係数0.275を掛けた112.75、および最小降伏点205 N/mm<sup>2</sup>に係数0.687を掛けた140.835のいずれか小さいほうをとり、112.75 N/mm<sup>2</sup>を許容引張応力とする。

蓋部、底部の直径  $d_1$ 、 $d_2$ については、蓋部の直径をオーバーパック内径の  $\phi 440$  mm に片側 10 mm の段差を設ける構造とし  $d_1 = \phi 460$  mm、底部直径をオーバーパック内径に等しく  $d_2 = \phi 440$  mm とする。

また、係数  $K$  は蓋板と胴本体との接合状態によって決定するが、今回想定したオーバーパック平板取付構造に対応する  $K$  値が定められていないため、最も保守的な値である「その他」の場合の 0.5 とした。

以上より平板の必要厚さは

硬岩系岩盤： 蓋部  $t_1$  : 100.1 mm 底部  $t_2$  : 95.7 mm

軟岩系岩盤： 蓋部  $t_1$  : 79.7 mm 底部  $t_2$  : 76.3 mm

となる。

## (2) 円筒胴の板厚

告示 501 号第 22 条に規定されている円筒胴部の板厚の計算は、その板厚が外径の 10% 以下の場合と 10% 以上の場合とで計算方法が異なる。予備計算の結果から、その板厚が外径の 10% 以下の場合の計算として、以下の計算式により求める。

$$t = \frac{3PD_o}{4B} \quad (4-2)$$

$$= \frac{D_i}{4B / 3P - 2} \quad (4-3)$$

ここに、

$t$  : 円筒胴板厚

$D_i$  : 円筒胴内径

$P$  : 最高使用圧力 (外荷重値)

$B$  : 告示別図第 5 から第 24 までにより求まる係数

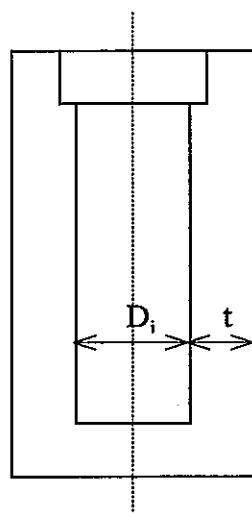


図 4-2 円筒胴板厚計算モデル

$B$  値については、告示の規定では「別図第 5 から第 24 までにより求める値」とされている。別図第 6 から第 24 はそれぞれ材料の種類に応じたものであり、今回想定したオーバーパック材料の SFVC1 は、その降伏点が  $205 \text{ N/mm}^2$  であり、別図第 6 に該当している。したがって今回の  $B$  値を求めるためには別図第 5 と第 6 を用いる。

$B$  値は任意の円筒胴板厚に対し、まず別図題 5 の線図から A なる値を求め、次に別図第 6 の線図によりこの A 値に対応する値として与えられる。ここでは別図第 5、第 6 に対して近似式を設定し、板厚、A 値および  $B$  値を繰り返し計算することにより最終的な板厚を求めた。

以上より円筒胴の必要厚さは

硬岩系岩盤：  $t = 45.2 \text{ mm}$  (A 値 : 0.0081  $B$  値 : 94.0)

軟岩系岩盤：  $t = 28.2 \text{ mm}$  (A 値 : 0.0037  $B$  値 : 89.3)

となった。

以上の板厚計算の結果を以下の表 4-1 にまとめる。平板部の板厚は蓋部、底部それぞれの値の大きい蓋部の板厚を代表として採用した。

表 4-1 必要板厚計算結果

	必要耐圧厚さ		
		硬岩系岩盤	軟岩系岩盤
平板部 (蓋部、底部)	計算結果	100.1 mm	79.7 mm
	設定厚さ	110 mm	80 mm
円筒胴部	計算結果	45.2 mm	28.2 mm
	設定厚さ	50 mm	30 mm

したがって、ここでは耐圧上必要な厚さとして、硬岩系岩盤で蓋部；110 mm、胴部；50 mm、軟岩系岩盤では蓋部；80 mm、胴部；30 mm と設定する。

#### 4.2.2 腐食厚さ

ここでは炭素鋼の寿命期間中の腐食厚さについて実験データに基づく評価を行った。

##### (1) 人工バリアの設定

ここでは、図1-2に示す廃棄体定置方式（硬岩横置き方式、硬岩堅置き方式、軟岩横置き方式および軟岩堅置き方式）の仕様に基づいて評価を行う。ここで腐食評価に影響する定置方式に関連した因子は緩衝材と埋め戻し材の量である。緩衝材はベントナイトとケイ砂を重量比7:3で混合し $1.6 \text{ Mg m}^{-3}$ の乾燥密度に圧縮したものを仮定した。埋戻材は坑道掘削時に発生するズリとベントナイトの混合物で、ベントナイト含有量は15 wt%である。また、その乾燥密度は $1.8 \text{ Mg m}^{-3}$ である。

##### (2) 酸素による腐食

酸素による腐食としては、緩衝材および埋め戻し材に取り込まれた酸素がすべて腐食によって消費されると仮定して、腐食量を評価した。炭素鋼オーバーパックの腐食に寄与する酸素の量は人工バリアの設定から横置き方式、硬岩堅置き方式および軟岩堅置き方式についてそれぞれ115 mol, 590 mol および 700 mol である。以下の反応式を仮定すると、この酸素によって 230 mol, 1180 mol および 1400 mol の鉄が腐食すると見積もられる。



これを炭素鋼オーバーパックの平均腐食深さに換算すると横置き方式、硬岩堅置き方式および軟岩堅置き方式についてそれぞれ 0.3 mm, 1.5 mm および 1.8 mm となる。

一方、人工海水および人工淡水を試験溶液として、この溶液とベントナイトを1:1の重量比で混練したスラリー中および、試験溶液中に炭素鋼試験片を浸漬した実験では、雰囲気に酸素が含まれる場合に腐食の局在化が認められた（石川ほか, 1992）。この局在化の影響を評価するため、実験により得られた最大腐食深さの結果について、極値統計解析を行ってオーバーパック一体あたりの最大腐食深さの推定値（指定信頼率0.99）を求め、重量減少から算定した平均腐食深さとの関係を求めた（石川ほか, 1992）。その結果、現時点のオーバーパック仕様を想定すると、以下の式で最大腐食深さの推定値の上限と平均腐食深さの関係を良好に近似することができた。

$$P = Xm + 7.5Xm^{0.5} \quad (4-5)$$

ここで P は最大腐食深さ推定値の上限[mm], Xm は平均腐食深さ[mm]である。

この式にオーバーパックの腐食に寄与する酸素量から求めた平均腐食深さを代入し、横置き方式、硬岩堅置き方式および軟岩堅置き方式についてそれぞれ酸素による最大腐食深さを 4.4 mm, 10.7 mm, 11.8 mm と評価した。

## (3) 水の還元による腐食

脱気海水中に炭素鋼試験片を浸漬し、腐食量と水素発生量の関係を調査した。その結果、以下の反応を仮定すると、水素発生量は腐食量と良い対応を示した（本田ほか、1997a）。



また、脱気した水溶液中（80°C）において炭酸水素イオン濃度（0.001～0.1 mol l<sup>-1</sup>）、炭酸イオン濃度（0.001～0.1 mol l<sup>-1</sup>）、塩化物イオン濃度（0.0028～0.28 mol l<sup>-1</sup>）を変えて1年間の浸漬試験を実施した（本田ほか、1997a）。その結果、炭素鋼の腐食速度は炭酸水素イオン濃度、塩化物イオン濃度のいずれにも依存しないことがわかった。炭酸イオン濃度が最も高い場合（0.1 mol l<sup>-1</sup>）に腐食速度の顕著な低下が認められたが、この条件はこの実験において最もpHが高い条件に対応する。したがって、この腐食速度の低下がpHの効果であるのか、炭酸イオンの効果であるのかは不明である。この実験では、炭素鋼の平均腐食速度は試験片の重量減少から 0.4～2.4 μm y<sup>-1</sup> と評価された。還元条件下における、静的地下水を模擬した環境中における炭素鋼の腐食速度を図4-3に示す。図中には Simpson and Valloton (1984) および Marsh et al. (1986) によって測定された腐食速度も示した。腐食速度は経時的に低下する傾向を示しており、2年以降には 5 μm y<sup>-1</sup> 以下の腐食速度が得られている（谷口ほか、1999a）。この速度が 1000 年間維持されると仮定すると、平均腐食深さは 5 mm 以下と見積もられるが、これらの試験は想定した環境条件をすべて網羅したものではない。よって、ここでは環境条件にともなう不確実性を考慮して 10 μm y<sup>-1</sup> の平均腐食速度を仮定した。したがって、1000 年間の平均腐食深さは 10 mm と評価された。

なお、環境条件にともなう不確実性の一例として、硫酸塩還元菌の活動や硫黄分の濃度の高い地下水を想定して硫化物による腐食量を見積もった。評価方法は後述する銅オーバーパックでの硫化物による腐食評価方法に従い、緩衝材中の硫酸塩が還元されてすべて腐食に寄与し、緩衝材外側からも拡散によって硫化物が供給されると仮定して計算を行った。その結果、最も腐食量の多い軟岩豎置きの場合で緩衝材中の硫酸塩の寄与による腐食深さは 0.5 mm、地下水中的硫黄分の寄与による腐食深さは 4.0 mm となった（本田・谷口、1999）。よって、平均腐食深さは 4.5 mm と見積もられ、環境条件にともなう不確実性による余裕度、5 mm を超えないことが確認された。

次に還元条件下での腐食の局在化について検討する。還元性環境では炭素鋼の腐食は不均一化しにくいこと（鈴木ほか、1997），圧縮ベントナイト中の浸漬試験では均一腐食が観察されていることなどから（石川ほか、1992），ほぼ均一な全面腐食の形態をとると考えられる。また、圧縮ベントナイト中における加速実験によると、平均腐食深さが大きくなると孔食係数は小さくなることが確認された。この実験データの極値統計解析結果から、平均腐食深さが 10 mm 程度の場合の最大腐食深さは平均腐食深さの 2 倍以下であることから（谷口ほか、1999b），ここでは 1000 年間の最大腐食深さを平均腐食深さの 2 倍の 20 mm と評価した。

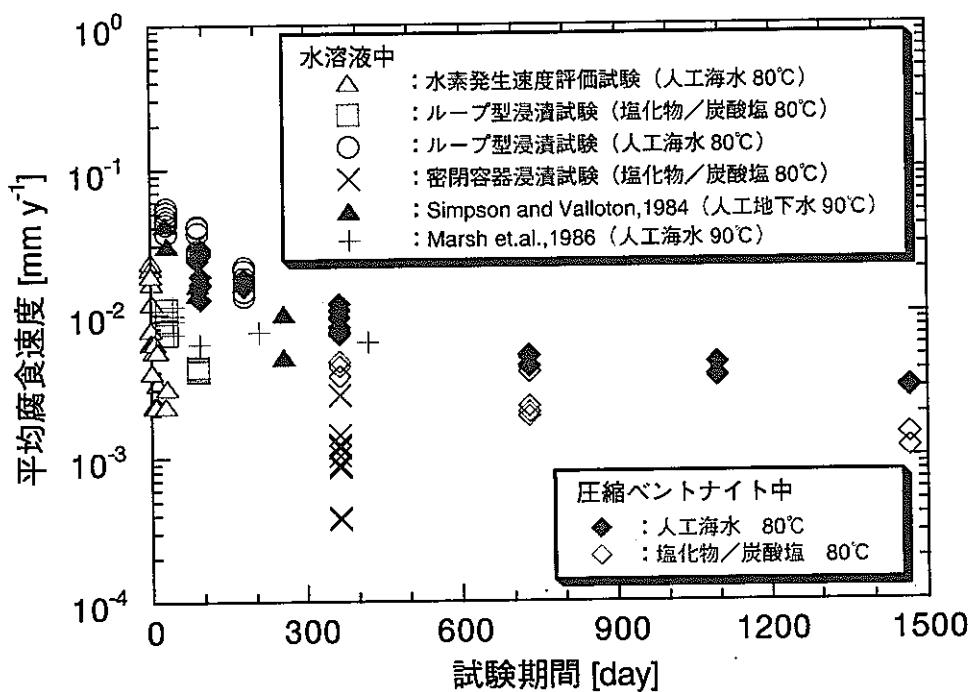


図 4-3 低溶存酸素濃度下での炭素鋼の平均腐食速度の経時変化  
(本田ほか, 1997a)

#### (4) 炭素鋼の腐食寿命評価

酸素による腐食深さ、水の還元による腐食深さを合算し、1000 年間の腐食深さを横置き方式、硬岩豎置き方式および軟岩豎置き方式についてそれぞれ 24.4 mm, 30.7 mm, 31.8 mm と評価した。淡水性粘土中の鋳鉄管から得られた経験式から予測された腐食深さは 1000 年間で約 15 mm と評価されている（炭山ほか, 1997）。また、国内外で考古学的鉄製品の長期の腐食事例の調査に基づき予測される 1000 年間の腐食深さは 1~14 mm である（Johnson and Francis, 1980; Araki et al., 1989）。これらの長期間天然環境にさらされていた鉄製品の腐食深さは前述の評価結果と同等以下であり、保守的な評価ができていると考えられる。

したがって、炭素鋼オーバーパックに、およそ 32 mm 以上の腐食代を与えることにより 1000 年以上の放射性物質の閉じ込めを期待できると考えられる。

以上の検討を踏まえ、設計寿命 1000 年間での炭素鋼オーバーパックの腐食量を設計上 40 mm と設定する。

#### 4.2.3 遮へい厚さ

オーバーパックの厚さによっては、オーバーパックを透過する放射線が引き起こす水の放射線分解により、酸化性化学種が生成し腐食に影響を及ぼすことが想定される。酸化性化学種の生成を模擬した実験によれば、圧縮ベントナイト中で炭素鋼は不動態化を起こしにくいこと (Taniguchi et al., 1998) から、局部腐食が生じる可能性は低いものと考えられるが、不確定な点も残されているため、水の放射線分解により生成される酸化性化学種の供給量を求め、これをカソード電流密度に換算し、鉄の局部腐食の進展を引き起こさないために放射線の遮へい上必要なオーバーパック厚さを検討した。(内藤ほか, 1999)

##### (1) 放射線場の解析

ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材および岩盤からなる3次元モデルを対象に、表4-2に示す条件をもとにオーバーパックの厚さをパラメータとした放射線場の解析を行い、オーバーパック表面位置での吸収線量率を算出した。

解析には、米国ロスアラモス国立研究所 (LANL) が開発したモンテカルロ法放射線輸送解析コード MCNP-4A (Briesmeister (ed.), 1993) を使用した。MCNP コードは、ベンチマーク解析 (Ganapol et al., 1994; Wemple et al., 1992a; 1992b など)、原子炉廻り遮へい解析 (Estes et al., 1985; Lu et al., 1991 など)、使用済燃料用キャスク遮へい (Broadhead and Parks, 1991; Ueki et al., 1992 など) などにおいて、その妥当性が確認されている。

- ソースタームには ORIGEN-2 の出力を利用し、放射線源としては、
- ・自発性核分裂による中性子線とその中性子線が発生させる  $\gamma$  線、
  - ・( $\alpha$ , n) 反応による中性子線とその中性子線が発生させる  $\gamma$  線、
  - ・核分裂生成物の崩壊にともなう  $\gamma$  線

を想定した。また、緩衝材の飽和度については、表4-2の解析条件に示すように水の放射線分解による腐食への影響が最大となる 100% を仮定した。

解析の結果から、オーバーパック表面での吸収線量率を図4-4に示す。

表4-2 放射線遮へい 解析条件

燃焼度	45,000 MWD tU <sup>-1</sup>
初期濃縮度	4.5 %
オーバーパックの材質	炭素鋼
緩衝材のケイ砂混合比	30 %
緩衝材の水による飽和度	100 %
固化後の冷却のための貯蔵期間	50 y

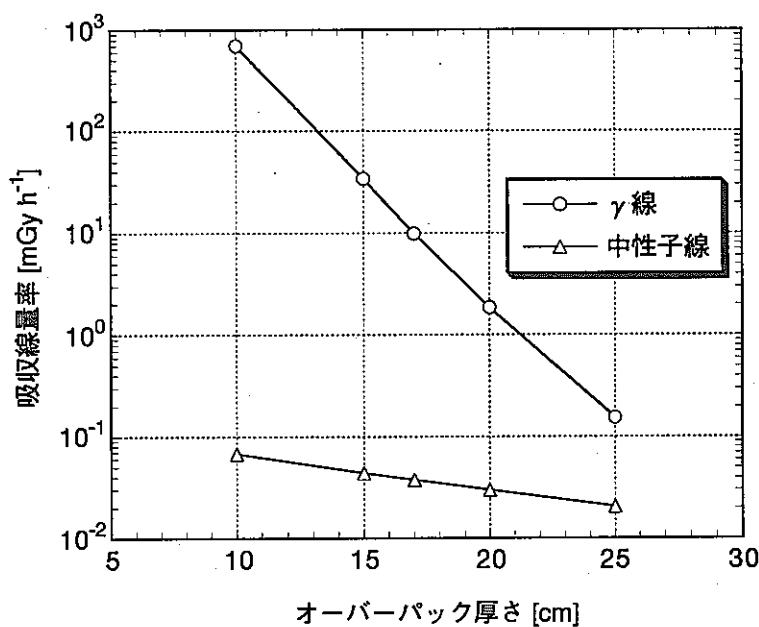


図 4-4 オーバーパック表面での吸収線量率  
(内藤ほか, 1999)

図から、オーバーパック表面での吸収線量率は $\gamma$ 線によるものが支配的であり、オーバーパックの厚さが増すにつれ、 $\gamma$ 線に対する遮へい効果は大きくなるが、中性子線に対しては顕著ではないことがわかる。

なお、上記解析では緩衝材の厚さを 700 mm (杉野ほか, 1999) として計算している。緩衝材の厚さが例えば 400 mm 程度に薄くなると、緩衝材を透過した中性子線がある程度岩体で反射し、緩衝材での吸収線量率が増加することになるが、図 4-4 に示すように中性子線の寄与は小さく、オーバーパック表面での総吸収線量率に顕著な差は現れない。

## (2) 放射線分解による腐食への影響

上述の吸収線量率をもとに、オーバーパック表面近傍の緩衝材での放射線分解を考慮した。水の放射線分解では多くの酸化性化学種が生成するが、放射線照射下の腐食実験から得られる測定結果には、腐食に寄与したすべての酸化性化学種の影響が含まれ、その結果から、これら酸化性化学種に対する G 値 (100eV のエネルギー吸収によって生成する化学種の分子数) が求まる。ここでは、実験結果にもとづき、生成した酸化性化学種の値数がすべて 2 倍 (たとえば H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) と仮定して求められた 2.13 (Marsh et al., 1989) を G 値として用いた。

また、放射線分解によって発生した酸化性化学種は、緩衝材に吸着しないものとし、すべてオーバーパック表面に供給され腐食に寄与するもの (カソード電流に変換) と仮

定した。緩衝材中の酸化性化学種の生成と移行は以下の拡散方程式で表わされ、酸化性化学種の生成はオーバーパック表面から離れるにしたがい減衰する。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Da \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + R_0 \cdot \exp(-\lambda x) \quad (4-7)$$

$$R_0 = \frac{p \cdot G \cdot E}{100 \cdot Av} \quad (4-8)$$

ここで、  $C$  : 酸化性化学種の濃度 [mol m<sup>-3</sup>]

$Da$  : 酸化性化学種のみかけの拡散係数  $1.2 \times 10^{-9}$  [m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>]  
(石川ほか, 1992)

$G'$  : 酸化性化学種の  $G$  値 : 2.13 [分子 eV<sup>-1</sup>] (Marsh et al., 1989)

$E$  : 吸収線量率 [eV m<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>]

$p$  : 緩衝材の間隙率 : 0.40 [-]

$Av$  : アボガドロ数 ( $= 6.023 \times 10^{23}$ ) [分子 mol<sup>-1</sup>]

$\lambda$  : 緩衝材の吸収係数 : 6.25 [m<sup>-1</sup>] (Marsh et al., 1989)

(4-7) 式よりオーバーパック表面 ( $x = 0$ ) での濃度勾配は、

$$\frac{dC}{dx} = \frac{R_0}{Da \cdot \lambda} \left[ 1 - \exp(Da \cdot \lambda^2 \cdot t) \cdot \text{erfc}(\lambda \sqrt{Da \cdot t}) \right] \quad (4-9)$$

で表わされ、定常状態において濃度勾配は  $R_0 / (Da \cdot \lambda)$  となる。したがって、オーバーパック表面に供給されるカソード電流密度  $I_{cath}$  [A m<sup>-2</sup>] は次式のように表わされる。

$$I_{cath} = -n \cdot F \cdot R_0 \cdot p / \lambda \quad (4-10)$$

ここで、  $n$  : 酸化性化学種の価数 (= 2) [-]

$F$  : ファラデー定数 ( $= 9.65 \times 10^4$ ) [C mol<sup>-1</sup>]

(4-10) 式から、オーバーパックの肉厚をパラメータ (10, 15, 17, 20, 25 cm) として求まるカソード電流密度を図 4-5 に示す。

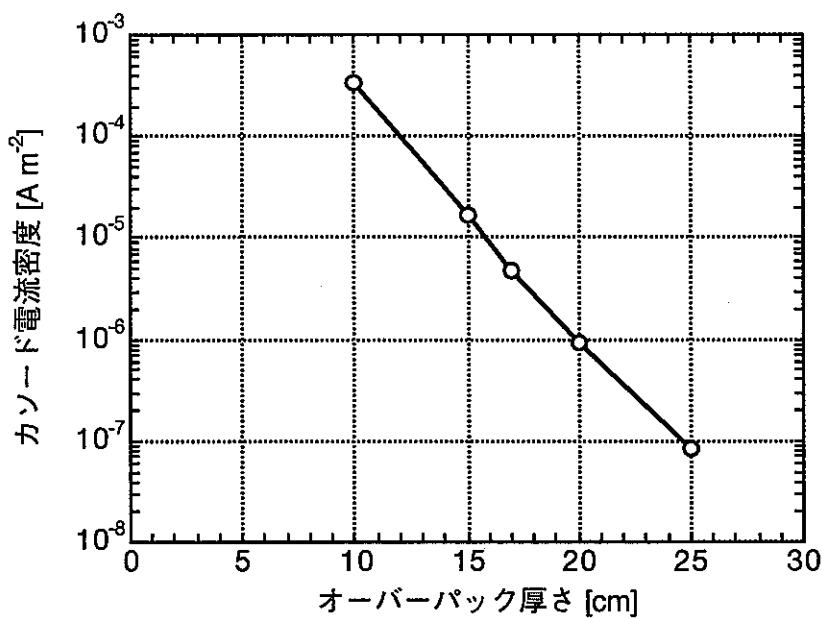


図 4-5 放射線分解により供給されるカソード電流密度

供給されるカソード電流密度が炭素鋼の不動態保持電流密度を下回れば、鉄の局部腐食は進展しない (Marsh et al., 1989)。これまでの知見に基づけば、炭素鋼の不動態保持電流密度は  $1.0 \times 10^{-4} \text{ A m}^{-2}$  (Marsh, 1990; 谷口ほか, 1994) 程度である。したがって、図 4-5 より局部腐食の進展を防止するために放射線の遮へい上必要な厚さは約 130 mm 以上であり、これを踏まえて本検討では設計上 150 mm と設定する。

すでに述べたように、ここで行った評価についてはまだ十分な知見が得られていないことから、今後研究開発の進捗によってはさらに厚さを低減できる可能性がある。

なお、ここで求めた遮へい上必要な厚さは、地下水の放射線分解による酸化性化学種の生成を抑制するために必要な厚さであり、地層処分場の操業時に作業従事者の直接接近を可能とするような遮へい厚さではない。基準を考慮すると 400 mm 以上の板厚が必要になるとの結果が得られており、そのような板厚を持たせることはオーバーパックのハンドリング上合理的でないため、地上施設におけるガラス固化体の封入、地下施設への搬送、地下処分坑道での定置等の各作業においては、遠隔操作を基本とし、作業の都合上ガラス固化体を内包したオーバーパックが直接暴露する作業については、別途放射線遮へい機能を備えた作業機器・設備を用いるという前提のもとでの検討結果である。

## (2) 放射線による材料の照射脆化

金属材料に放射線が照射されると、その結晶中に格子欠陥が形成され材料の物理的性質や機械的性質が変化する。オーバーパック材として選定した体心立方格子を有するフェライト系鋼材では、照射温度がその融点の半分以下であると照射硬化と照射脆化が起こり、降伏強度や引張強さは増加するが、伸び、衝撃値は低下する。一般に、脆化の程度は延性脆性遷移温度 (ductile-brittle transition temperature : 以下「DBTT」という) の上昇量で表現される。

照射脆化がオーバーパックの耐圧性に有意な影響を及ぼさない程度であることを確認するため、脆化が最も著しいと考えられるオーバーパックの内表面について、 $\gamma$ 線と中性子線による埋設後 1,000 年間の dpa (displacement per atom : 材料原子あたりのはじき出し数) を保守的に概算し、これを鋼に関する中性子照射データの統計解析によって導出された式 (Porter, 1960) に代入し DBTT の上昇量を求めた (本間ほか, 1999b)。

その結果、DBTT の上昇は埋設後 1000 年間で 10°C 未満と評価された。dpa を保守的に算出したことも考慮すれば、脆化後も DBTT は数十度から百数十度のオーバーパックの使用温度に対して十分に低く、オーバーパックの脆化はその機能発揮上無視しうることが予測される。

#### 4.2.4 オーバーパック厚さの設定

以上の炭素鋼オーバーパックの厚さに関する検討結果を踏まえ、以下の表 4-3 に示す通り厚さを設定する。

表 4-3 炭素鋼オーバーパックの厚さ

	硬岩系岩盤		軟岩系岩盤	
	蓋部	円筒部	蓋部	円筒部
① 耐圧厚さ	110 mm	50 mm	80 mm	30 mm
② 放射線遮へい厚さ	150 mm			
③ 腐食代	40 mm			
オーバーパック厚さ max (①,②) + ③	190 mm			

このように、ここでは炭素鋼オーバーパックの厚さを、岩盤の種類、オーバーパックの部位によらず、放射線遮へい厚さ 150 mm（耐圧厚さを含む）に腐食代 40 mm を加え 190 mm と設定する。

ここで設定した 190 mm という値は、耐圧厚さに対して十分な余裕を持つ結果となった。耐圧厚さを求める際に設定した設計温度は、緩衝材の熱変質防止のための表面温度制限値 100°C に余裕を見込んだ 150°C と設定したことも考え合わせれば、地層処分後に本仕様のオーバーパックに発生する応力は、処分後にさらされうる温度におけるオーバーパック材料の降伏点に対して十分な余裕をもつと考えられる。

#### 4.2.5 偏圧の作用による影響の検討

4.2.1 項では、荷重がオーバーパックに全方位から均一に作用するものとして、その耐圧上必要な厚さを告示 501 号に規定されている強度計算式を用いて算出した。実際には、緩衝材の偏膨潤やオーバーパック自体の不均一な腐食膨張などによって、オーバーパックには方位によって異なる荷重（以下、「偏圧」という。）が作用することも十分に考えられるが、発生し得る偏圧の程度を評価し得る明確な知見は現状得られていない。そこで、オーバーパックの耐圧強度上の限界となる偏圧状態を把握することを目的に、図 4-6 に示す平面ひずみのモデルを用いて、同図に定義した偏圧係数  $K$  をパラメータとした有限要素法解析を行い、オーバーパックが過大に変形すると予想される荷重  $P^1)$  を算出した。結果を図 4-7 に示す。

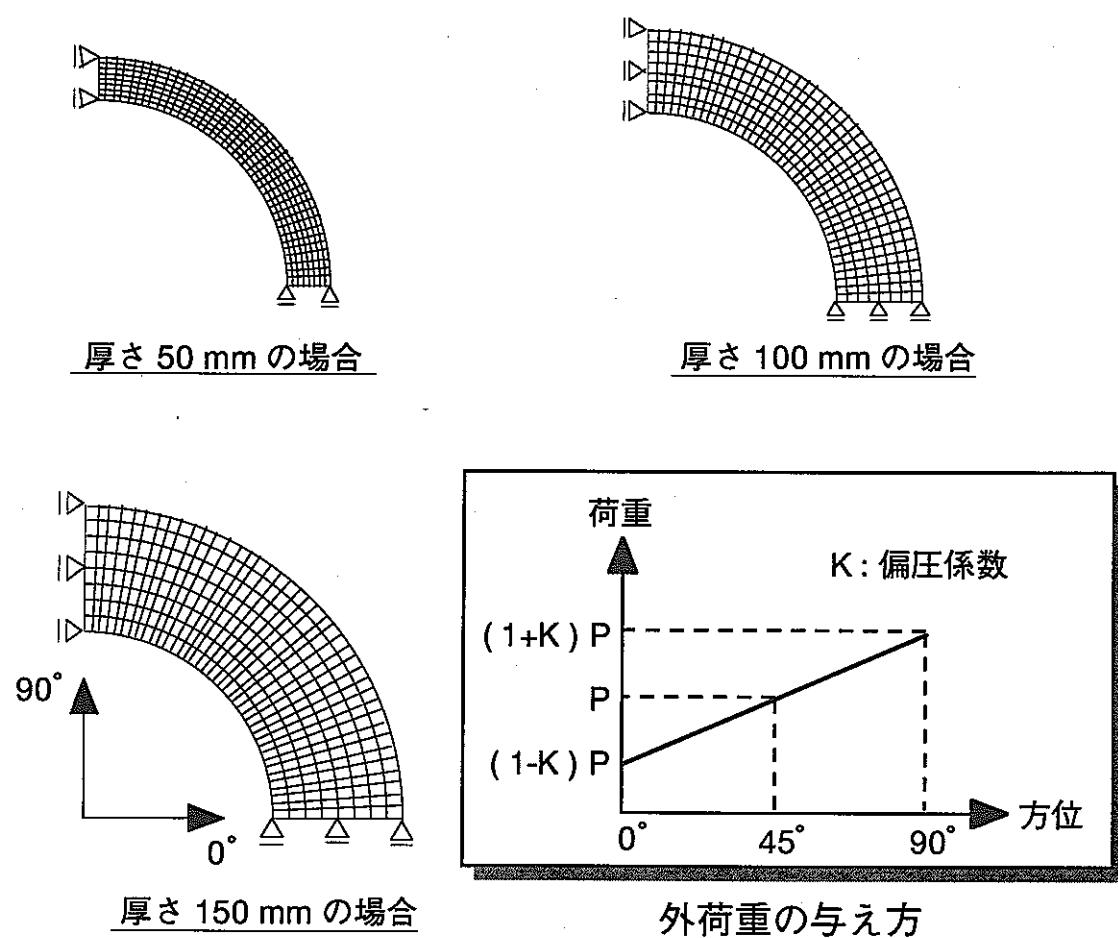


図 4-6 偏圧解析モデル

<sup>1)</sup> オーバーパックの半径と板厚の比が現在想定している程度の値の場合、オーバーパックに偏圧を作用させると、解析上オーバーパックの内面または外面が最初に降伏し、荷重の増加にともなって塑性化した領域が拡大する。さらに荷重が増加しこれが反対側の面から拡大してきた塑性域とつながると、荷重の増加をあまりともなわざとも変形が進展するようになる。そこでここでは、塑性化した領域が内面から外までつながった時点の荷重をオーバーパックが過大に変形する荷重  $P$  とした。

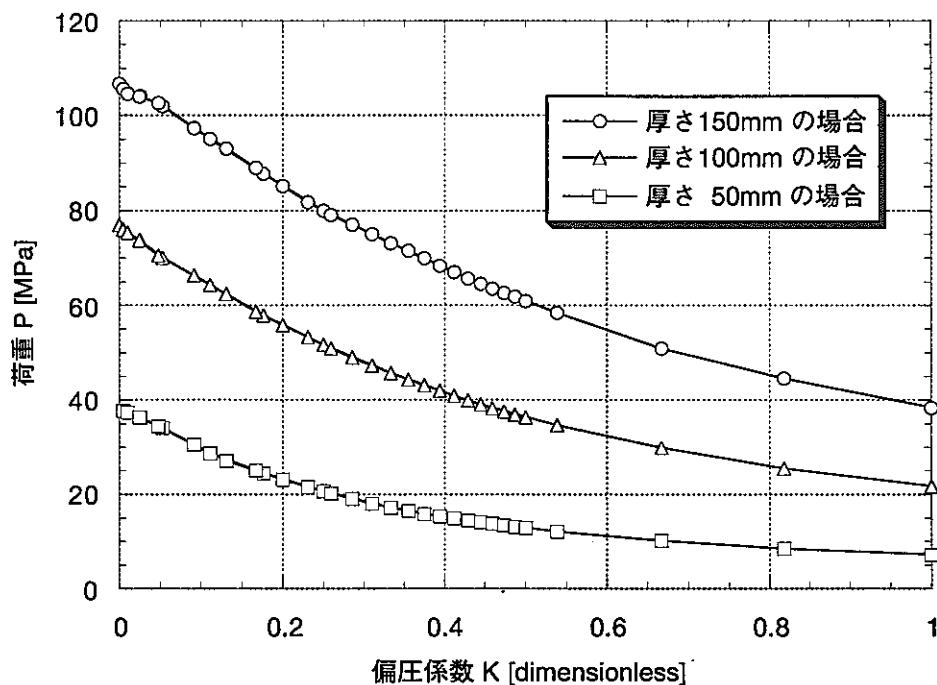


図 4-7 オーバーパックが過大に変形すると予想される荷重

この結果から、厚さ 150 mm のオーバーパックは、たとえば  $K = 1$  のような極端な偏圧状態におかれた場合でも、 $P$  が 35 MPa 程度以上でなければ過大な変形を生じないものと考えられる。ここで、150 mm は、4.2.4 で設定したオーバーパック厚さ 190 mm のうち、結果として耐圧機能を期待可能な厚さである。したがって、緩衝材の膨潤やオーバーパックの腐食膨張がその進行過程において一時的にある程度不均一化したとしても、4.2.1 で評価した荷重値が 10 MPa 程度であることを考慮すれば、4.2.4 で示した厚さのオーバーパックはこれらに対し、現状の想定においては十分な裕度を有するものと推測される。

#### 4.2.6 処分孔の変形の影響の検討

岩盤のせん断変位による影響については、Börgesson (1992) が、スウェーデンの人工バリア概念に対して、人工バリア周りの岩盤のせん断変位を模擬した解析を実施している。この結果、仮に岩盤が緩衝材厚さ 0.35m に対して 0.1m 程度せん断方向に変位したとしても、使用済燃料を収納するキャニスター<sup>2)</sup>は変形するものの、破断に至ることはないと評価している。本節で設定したオーバーパックは、このキャニスターに比べて、軸方向の長さに対する胴部の直径が大きくなっている、オーバーパックの軸方向の曲げに対して、より強い形状である。このことから、仮に緩衝材厚さ 0.7m に対して 0.2m 程度 ( $0.7 \times \frac{0.1}{0.35} = 0.2$ ) 岩盤がせん断変位したとしても、オーバーパックの変形は小さく、破断に至る可能性は少ないと考えられる。

スウェーデン (Werme, 1998) やフィンランド (Raiko and Salo, 1999) において、使用済燃料を収納するキャニスターの設計荷重として、軸方向の偏圧や岩盤のせん断変位の影響を評価した例がある。

将来、処分予定地が選定されれば、このようなオーバーパックに不均一に作用する荷重の影響を含め、サイトの具体的な地質環境条件に応じて設計がなされ、最適なオーバーパック厚さが設定される。

<sup>2)</sup> スウェーデンやフィンランドなどでは、使用済燃料を直接金属性の容器に格納し、地層中に埋設することとしており、この金属性の容器をキャニスターと呼んでいる。日本では、ガラス固化体を金属性の容器に格納し地層中に埋設することとしており、この金属性の容器をオーバーパックと呼んでいる。スウェーデンやフィンランドなどでいうキャニスターに期待される機能は、基本的にオーバーパックと同じである。

#### 4.3 製作性、施工性からの検討

部材構成や各部材の形状などオーバーパックの詳細構造については、適用しうる製作技術や搬送および定置時のハンドリング方法について十分検討のうえ、これらに対し適切に設定される必要がある。

##### 4.3.1 蓋と円筒胴の製作

鍛造による材料製造および成形加工は、前項までの検討で想定されたオーバーパックの大きさに対しては、現状技術で十分対応可能であり、とくに問題ないことが試作を通じ確認されている。第1次取りまとめにおける炭素鋼オーバーパックの試作例を図4-8に示す。

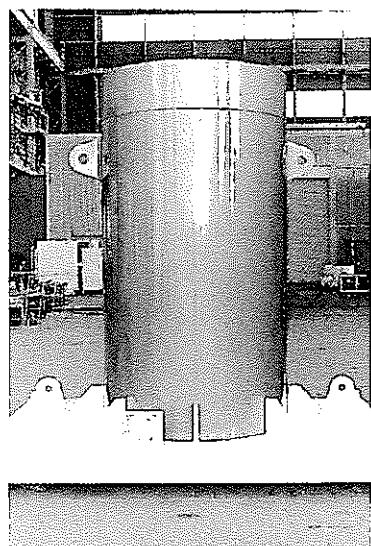


図 4-8 炭素鋼オーバーパックの試作例（本田ほか, 1992）

この試作では、中実状の鍛造材から円筒部と底部を一体で成形する構造を採用しているが、中空鍛造により製作した円筒部材に底板を溶接する構造も考えられる。この場合の底部の溶接は、オーバーパック内部にガラス固化体が存在する封入溶接の場合とは異なり、十分な予熱、後熱が可能で遠隔自動化の必要性もないため、現状技術で十分な品質を確保することは可能と考えられる。最終形状に対し物量的にも合理的な構造となるが、溶接部が増えるため、品質管理上の負担は前記の構造に比べて大きくなる。いずれの構造が適切であるかについては、量産を前提に詳細なコスト比較などが必要と考えられ今後の課題である。

#### 4.3.2 封入および検査

処分場での封入溶接やその検査、およびオーバーパックのハンドリングの方法に対する要求事項を、前述 項の記述から抽出して整理すると表 4-4 のようになる。

表 4-4 封入、検査およびハンドリングの各方法に対する要求事項

考慮すべき事項	
封入溶接	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高品質な溶接が可能であること</li> <li>・ガラス固化体に有意な熱影響を与えないこと</li> <li>・溶接能率が高いこと</li> <li>・遠隔自動化が可能であること</li> </ul>
溶接検査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・信頼性の高い検査が可能であること</li> <li>・遠隔自動化が可能であること</li> </ul>
ハンドリング	<ul style="list-style-type: none"> <li>・確実なオーバーパックの把持が可能であること</li> <li>・狭い空間での作業が可能であること</li> </ul>

#### (1) 封入

前述の評価結果から、オーバーパックの厚さは 190 mm となる。一般に、このような炭素鋼厚板の溶接では、急冷を抑えて低温割れを防止するための予熱のほか、溶接部の軟化や延性回復などの特性改善、残留応力の緩和および水素の放出などを目的とした溶接後熱処理が必要となる。特に、溶接後熱処理では 600°C 程度の温度に一定時間加熱保持する必要があることから、内部のガラス固化体に対する影響を考慮するとオーバーパックへの適用は好ましくない。したがって、オーバーパックの封入には極力低入熱で材料に与える熱影響を小さくし、溶接後熱処理が不要となる溶接方法が適切と考えられる。また、水素による遅れ割れの防止や長期の品質保証といった観点から、不純元素や異物混入の可能性の少ない方法が望まれる。これら品質のこと以外では、操業の観点から適切な作業能率を有することが望まれ、最終的な封入方法の選定では遠隔自動化の可否が重要となる。考えられるいくつかの方法に対し、封入方法としての適用性について比較評価した結果を表 4-5 に示す。

表 4-5 封入方法としての適用性に関する比較評価

	1 パス溶接法		多層盛り溶接法		
	電子ビーム溶接法	レーザー溶接法	TIG <sup>*2</sup> 溶接法	MIG <sup>*3</sup> 溶接法	MAG <sup>*4</sup> 溶接法
低入熱	◎	◎	△	○	○
不純物混入の回避	◎	◎	○	○	△
作業能率	◎	◎	△	○	○
厚板への適用性	◎ <sup>*1</sup>	×	△	△	△
遠隔自動化の可能性	◎	◎	○	△	△

[凡例] ◎: とくに良い, ○: 良い, △: やや劣る, ×: 劣る

\*1 炭素鋼周溶接で 80 mm 程度の厚さまで確認済み

\*2 Tungsten Inert Gas の略, \*3 Metal Inert Gas の略, \*4 Metal Active Gas の略

電子ビーム溶接法は、真空中で形成した電子ビームを照射した際の衝突発熱により、材料を溶融接合させる方法である。熱の集中性が高く、溶接速度も速いため、低入熱で熱影響部のきわめて狭い溶接が可能である。真空中で溶接材料を用いず直接母材を溶融接合するため、空間や溶接材料からの不純物混入の可能性も少ない。予熱の必要がなく、一度に深い溶け込みが得られるため作業能率も高い。比較的厚肉の場合でも高品質な溶接が短時間で可能であり、オーバーパック封入方法の有力な候補の1つと考えられる。

電子ビーム溶接法によるオーバーパック封入にあたっては、内部のガラス固化体への悪影響を回避するため、溶接継手の形状は入射したビームを貫通させない構造が望ましい。また、欠陥発生時の補修方法や周溶接最終端の処置などが重要な課題となる。チタン-炭素鋼複合オーバーパックの試作においては、内側の炭素鋼製容器の蓋溶接に裏当て部を設けた構造を採用し、厚さ80mmまでの溶接が可能であることを確認した(本田ほか, 1999a)。また、周溶接ではないが、平板の突き合わせ溶接試験において200mm厚さまで可能であることが確認されている(本田ほか, 1992)。

TIG溶接法やMIG溶接法などの多層盛り溶接法は、オーバーパック厚さ190mmの溶接では、パス数が非常に多くなるため材料に与える入熱が比較的大きくなるほか、現状では作業能率の点においても問題と考えられる。しかし、これらの方法は原子力関連機器において多くの実績を有するとともに、遠隔操作による自動溶接技術も実用化されていることから、ホットワイヤ溶接法の採用や溶接部の狭開先化、電子ビーム溶接法との併用などにより、適用性の向上が期待される。

今後は、電子ビーム溶接法により施工可能な限界厚さの向上や、TIG溶接法などの多層盛り溶接法との併用に関する技術開発を行うとともに、溶接部やその熱影響部に対する腐食試験、機械試験および残留応力の評価などを実施して、溶接部に要求される品質を定量化する必要がある。また、耐食性の観点から必要とされる厚さ(腐食代)分だけの部分溶け込み溶接でオーバーパックの健全性が確保可能となるような、溶接部に母材と同等の強度が要求されない蓋の構造などについても、代替案として検討する必要があると考えられる。

(2) 検査

封入溶接部に対しては、その健全性を確認するために検査が必要となり、非破壊試験や漏えい試験の適用が考えられる。

① 非破壊試験

溶接部の内部欠陥を検出する方法としては、超音波探傷試験や放射線透過試験などがある。このうち、超音波探傷試験は封入溶接部に対する検査の候補方法として諸外国（たとえば、SKB, 1995）においても検討されている。厚肉部への適用性や自動化の観点などから最も有望な方法と考えられる。一方、放射線透過試験は、放射線を発するガラス固化体の存在やX線源とフィルムの配置上の問題などから現状適用は不可能と考えられる。

超音波探傷試験では、欠陥の性状により、一定方向からの超音波の入射では反射波を探触子で捕らえられない場合がある。欠陥の見落としを防止するため、垂直法と斜角法の併用により複数の入射角で試験を実施することが望まれる。このことから、オーバーパックの蓋の形状設定では、溶接線近傍に超音波の伝播を妨げる構造的な不連続部がなく、探触子の適切な走査範囲を確保できるよう配慮する必要がある。

## ② 漏えい試験

漏えい試験（リーク試験）の方法には、ヘリウムリーク試験、アンモニアリーク試験、ハロゲンリーク試験などがある。これらのうち、アンモニアリーク試験とハロゲンリーク試験については、残留ガスと容器材料との長期にわたる化学的な作用について評価が必要となることから、化学的に安定なヘリウムをサーチガスとして用いたヘリウムリーク試験のオーバーパックへの適用が、各国で検討されている。サーチガスの導入方法として、一般的には加圧法や減圧法（真空法）などがあるが、この場合被検体には加圧や真空引きのための貫通孔が必要となる。漏えい試験を行うオーバーパック自体にこのような貫通孔を設けることは合理的ではないため、オーバーパックに対し漏えい試験を実施する場合には、サーチガスの導入方法を工夫する必要がある。貫通孔を設けることなく漏えい試験を行える可能性のある方法を表4-6に示す。

表4-6 漏えい試験におけるサーチガスの導入方法案

方式	手 順	適用上の問題点
加圧／減圧法	① 溶接の完了したオーバーパックを耐圧容器の中に入れる ② 耐圧容器内に高圧のヘリウムガスを充填する（貫通欠陥がある場合にはオーバーパック内にヘリウムガスが侵入する） ③ 一定時間後、オーバーパックを耐圧容器から真空チャンバーに移す ④ 真空チャンバー内を真空に引く（欠陥がある場合にはオーバーパック内からヘリウムガスが流出する）	・欠陥の程度によりオーバーパック内に侵入しリークチェック時まで残存するヘリウムガス量が一定とならず、検出感度に対し適切な試験条件（ヘリウムガスの充填圧力と充填時間、チャンバー内の真空度など）の設定が困難
溶接前充填法	① 真空チャンバー内で電子ビーム溶接を低真空ヘリウム雰囲気で実施する ② 溶接の完了したオーバーパックを別の真空チャンバーへ移す ③ 真空チャンバー内を真空に引く（欠陥がある場合にはオーバーパック内からヘリウムガスが流出する）	・低真空ヘリウム雰囲気での溶接の施工性 ・検出感度に対し適切な溶接雰囲気の確保

これらには解決すべき種々の問題点も含まれており、漏えい試験の実施についてはその必要性も含めて今後さらなる検討が必要となる。

### 4.3.3 ハンドリング

オーバーパックには、ガラス固化体の封入工程以降の各種搬送設備への積み替えや定置作業などにおいて、遠隔操作によるハンドリングが必要となる。オーバーパックのハンドリング方法としては、以下に示すようなものが考えられ、それらは吊部の有無によって分類できる。

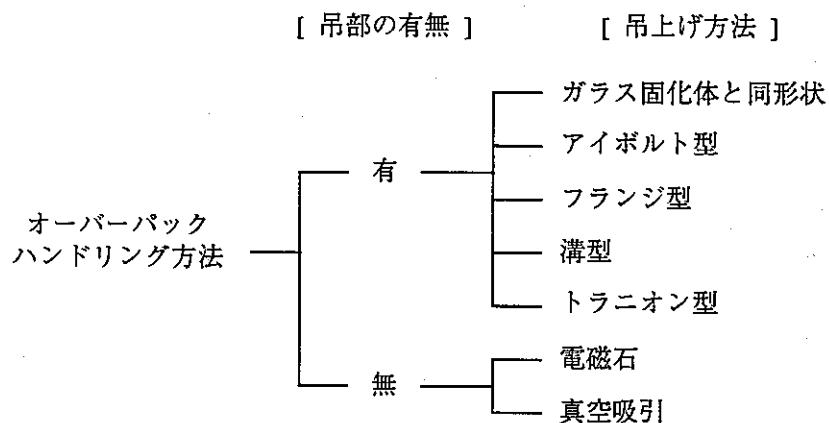


図 4-9 オーバーパックのハンドリング機構

これらのうち、電磁石や真空吸引などを利用した把持方法については、電源喪失時の対策が問題となるほか、吊上げ能力や設備規模の点においても課題が多い。ガラス固化体を内包するオーバーパックのハンドリングでとくに重要な把持の確実性の観点から、現状では機械的機構によるハンドリングが最も適切な方法と考えられる。

これらの機械的機構によるハンドリング機器との取り合い部の概念図を以下の表 4-7 に示す。以下の理由から、表中の(a)すなわちガラス固化体と同形状の構造が操業システムを構築するうえで成立性の高い方法の 1 つと判断される。

表 4-7 ハンドリングの観点からのオーバーパックの形状案

ハンドリング機器との 取り合い部が頂部にあるもの		ハンドリング機器との 取り合い部が側面にあるもの		
(a)ガラス固化体と 同形状	(b)アイボルト型	(c)法兰ジ型	(d)溝型	(e)トラニオン型

- ① 坑道横置き定置の場合、径 2.2m の坑道内において、設置済みの下部緩衝材の上にオーバーパックを吊り上げて降ろすことはスペース的に困難である。横向きのオーバーパックをサポートで支持した状態で、ピストンなどにより坑道軸方向に押し込む方法の採用が考えられるが、不具合が発生した場合に定置済みのオーバーパックを引き出すためには、取り合い部がオーバーパックの頂部に位置する方が都合が良い。
- ② 処分孔豎置き定置では、処分孔底部に設置済みの緩衝材上に、豎向き状態のオーバーパックを吊り降ろすことになる。ハンドリング機器との取り合い部がオーバーパックの側面にある場合と頂部にある場合とを、径 2.2m の処分孔内での作業性の観点で比較すると、前者はハンドリング機器の大きさがオーバーパックの外径以上となり、機器の着脱のためのスペースも必要となることから、後者に比べ劣ると考えられる。
- ③ 表中の(a)は、ガラス固化体と同様な形状である。ガラス固化体の取り扱いにおいてすでに実績のある方法であるため、遠隔着脱機構の実現性や安全に対する信頼性の面でも有望な方法である。

電力中央研究所・電気事業連合会の研究においても、ハンドリング作業の成立性の観点からオーバーパックの各種形状案に対する比較評価が行われており、その結果として本方法の有効性が示されている（電力中央研究所・電気事業連合会、1999）。

#### 4.4 オーバーパック仕様例

以上の検討に基づく炭素鋼オーバーパックの仕様例を図 4-10 に示す。第 1 次取りまとめにおいて示した仕様と比較すると、設計条件、設計の考え方などの見直しなどにより厚さが約 30% 減となった。

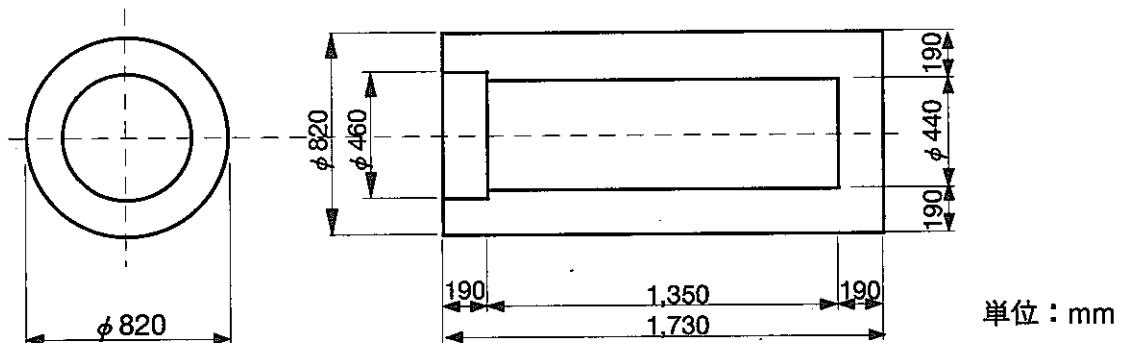


図 4-10 炭素鋼オーバーパックの仕様例

すでに述べたとおり、厚さの設定にかかる各評価においては多分に保守的な条件設定が含まれており、今後の研究開発の進捗によってさらに厚さを低減できる可能性がある。また、将来処分サイトが特定されれば、具体的な地質環境条件や処分深度に応じたより合理的な設計により、オーバーパックの厚さの最適化を図ることが可能となる。

一般工場での製作となる円筒本体の部材分割化については、オーバーパックが大量生産されることを前提に、品質管理も含めた詳細な製作コスト評価を実施したうえで最終決定すべきと考えられ、今後の課題の 1 つである。

封入溶接継手の位置やその形状については、求められる溶接品質が現状定量化されていないことから改善の余地を多く含んでおり、試験を通じた継手性能に関する各種データの取得などを実施したうえで、超音波探傷による検査性の観点も含めて最適化を図る必要がある。

## 5. 複合オーバーパックの設計の考え方

専門部会報告書に従い、地下深部における地質環境条件のバリエーションに柔軟に対応するとともに、オーバーパックの長寿命化を図るといった観点から、炭素鋼オーバーパックの代替案として複合オーバーパックについても検討を行った。

複合オーバーパックとは、2.2項でも示した通り、炭素鋼製容器を、チタン、銅といったある条件できわめて高い耐食性を示す材料によって被覆した複合構造のオーバーパックのことである。内側の炭素鋼に強度部材としての機能を、外側のチタンまたは銅に耐食機能をそれぞれ期待する。内側の炭素鋼製容器については、基本的に炭素鋼オーバーパックと同じ考え方で耐圧設計、製作が可能である。

したがって、複合オーバーパックの設計では、耐食材料の腐食評価と炭素鋼製容器の全外面を耐食材料で覆うための製作方法が重要な課題である。

腐食評価については、基本的に寿命期間中の腐食量を見積もり、耐食性金属層の厚さを適切に与えることで対応できる。

地下水の放射線分解により発生する酸化性科学種による腐食については、炭素鋼オーバーパックにおいては局部腐食を生起させない電流密度から必要厚さを求め、オーバーパック板厚をこの値以上とすることで腐食を抑制する考え方を採用したが、複合オーバーパックにおいては、その外面をチタン、銅などの耐食性金属で被覆するため、別途検討が必要になると考えられる。

チタンにおいては、大気平衡の自然電位とすき間腐食生起電位とのそれとの比較によって腐食生起の判定が行われている（本田ほか、1997b）が、放射線による地下水の放射線分解生成物によって自然電位がどのように変化するのか現状では明らかでない。

銅は放射線分解によって生成する酸化性化学種の量をどの程度まで抑えるべきかについての考え方や尺度が現状では不明である。しかしながら、仮に炭素鋼オーバーパックの場合と同様に遮へい必要板厚 150 mmとした場合、寿命期間の 1000 年間でその腐食厚さは数十  $\mu\text{m}$  程度であり、事実上無視できる値となる。

したがって、複合オーバーパックにおいては、炭素鋼と耐食性金属とを組み合わせた状態での放射線遮へい能力の把握と、放射線量と酸化性化学種生成量の把握ならびにチタン銅それぞれの腐食量算定への反映のさせ方の検討が必要であり、今後の課題である。

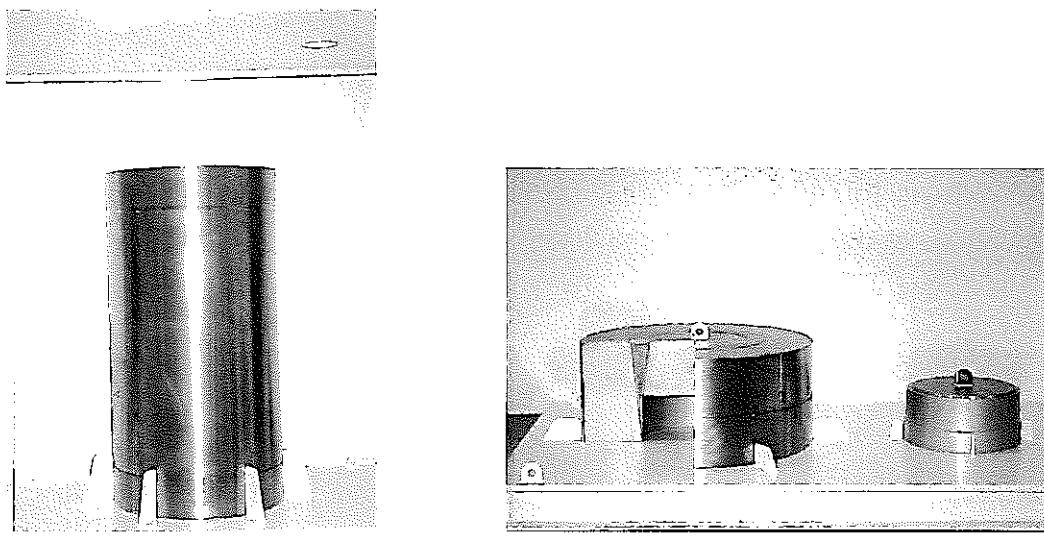
耐食性金属の被覆施工法については、現状技術の中で様々な適用可能性を持つ技術が存在する。異なる金属を組み合わせるため、両者の境界のすき間を許容するか否か、その取り扱いによって、採用される施工法は異なるものと考えられる。

複合オーバーパックに特有な現象としてガルバニック対の形成があるが、これはチタンや銅などの「貴」な金属と、炭素鋼などの「卑」な金属とが、水が介在した状態で接触すると両者の間に起電力が発生し、「卑」な金属が腐食する現象であり、外面の耐食性金属が腐食により貫通し内部の炭素鋼に地下水が到達した場合に発生すると考えられる。仮に外面の耐食性金属（貴）と内面の炭素鋼（卑）との間にすき間が存在した場合でも、両者が接触することは避けないこと、また密着する、しないに関わらず1000年間のオーバーパック寿命期間中においては、外面の耐食性金属が早期に貫通すること防止できる限り考慮する必要はないことなどから、すき間の取り扱いは腐食の観点からよりも製作性の観点からの検討によると考えられる。

耐食性金属と炭素鋼とのすき間、すなわち密着性が要求される場合には炭素鋼容器の全外表面への耐食性金属の肉盛溶接や、焼きばめ法、圧入などの施工法が考えられ、逆に密着性が要求されない場合には、両者を別々の容器として製作後に炭素鋼容器を挿入する方法、ビス止めあるいは局部的な溶接によって被覆する方法などが可能となる。

すき間の存在については、外圧による耐食層の座屈を引き起こし最悪の場合割れが生じて早期の地下水進入となることも懸念される一方、自由度があり安全という見解も存在することから、その許容できる大きさの定量化を含めて今後検討が必要である。

現有技術での複合オーバーパックの製作可能性を検討するために、チタン、銅それぞれを耐食性金属に用いた複合オーバーパックの試作を行っている（本間ほか 1999a, 1999b）。試作容器の外観を以下の図 5-1, 5-2 に示す。



胴部

蓋（右側）および溶接部断面

図 5-1 試作したチタン-炭素鋼複合オーバーパックの外観

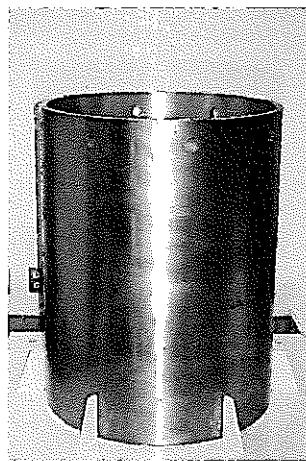


図 5-2 試作した銅製外容器の外観

二重容器の銅製外容器のモデル 容器の高さは実規模の約 1/2 (他はフルスケール)

## 6. オーバーパックの品質管理

オーバーパックの品質管理は、材料調達に関する管理、材料の2次加工、組み立てに関する管理、処分場地上施設におけるガラス固化体封入時の管理に大別される。これら各段階において管理すべき具体項目を表2-2で示した各設計要件に基づき抽出・整理すると表6-1のようになる。ガラス固化体が内部に存在することから、封入溶接時などの入熱が地層処分におけるオーバーパック特有の項目となり得るが、それ以外については圧力容器など溶接構造物の製作などで通常行われているものである。

管理手段となる遠隔自動での非破壊試験などについては実現可能性の確認に向けた開発課題が残されているが、品質管理手法（体系的な品質管理の考え方）については一般産業において実績のある手法を適用することにより対応が可能と考えられる。

表6-1 オーバーパックの品質管理項目

設計要件	品質管理項目		
	材料調達時	2次加工・組立時	封入溶接時
① 閉じ込め性を有すること	・有害な欠陥の有無	・有害な欠陥の有無	・有害な欠陥の有無
② 耐食性を有すること	・材料組成	・加工条件 ・板厚	・有害な欠陥の有無
③ 耐圧性を有すること	・材料強度 ・有害な欠陥の有無	・加工条件 ・有害な欠陥の有無 ・真円度 ・板厚	・有害な欠陥の有無
④ 耐放射線性を有すること	・材料組成		
⑤ 放射線遮へい性を有すること	・有害なボイドの有無 ・材料組成	・有害なボイドの有無 ・板厚	
⑦ 十分な内空間を有すること		・ガラス固化体収容 孔寸法(径, 深さ)	
⑪ 遠隔封入性を有すること		・ガラス固化体収容 孔寸法(径, 深さ)	・溶接条件
⑫ 遠隔定置性を有すること		・外形寸法(径, 高さ) ・把持部寸法, 強度	
管理手段	・ミルシートの確認 など	・加工条件の確認 ・非破壊検査 ・寸法計測 など	・封入条件の確認 ・封入作業の監視 ・非破壊検査 など

## 7. 今後の検討課題

本検討で上げられたいくつかの検討課題について今後の見通しをまとめるとする。

### (1) 技術基準の制定

現状オーバーパックに適用される基準・法律は整備されていない。将来の地層処分事業開始の際には事業認可、安全審査の立場から技術基準が必要になる。安全審査では技術基準に適合することを示す必要があるため、技術基準として制定された場合において技術的に妥当性を証明できないような項目は制定すべきでない。したがって基準項目の策定にあたっては技術的妥当性を証明することが困難な項目が無いか確認することが重要である。

また、オーバーパックに対する基準を想定する場合、現状の原子力関連設備に対する基準に網羅されている構造設計、品質確保に関する基準に加え、以下の点についても網羅される必要があると考えられる。

- ・深地層環境下での耐食性に関する解析指針と基準
- ・他の人工バリアとの相互作用に対する解析指針と評価基準
- ・種々の長期的挙動に対する解析指針と評価基準

### (2) 板厚低減と設計最適化

本検討におけるオーバーパックの板厚設定に関しては、耐圧性および耐食性から決定した。

耐圧性については現状基準が存在しないため原子力発電設備用に制定された「発電用原子力設備に関する技術基準」(告示 501 号) の第 2 種容器に準じた設計を行った。告示 501 号の対象とする発電用原子力設備に比べて荷重の変動が少なく、また内圧ではなく一定の外圧荷重を受ける圧肉構造物であるオーバーパックにとっては、告示に基づく従来の設計方法は過剰に保守的になっている可能性がある。今後は解析結果や各種試験の十分な裏付けに基づいた合理的な許容値設定によって、必要板厚の低減化をはかることが出来ると考えられる。

耐食性に関しては、地下水の放射線分解抑制のための放射線遮へい厚さと、寿命期間中の腐食代が、本検討において提示したオーバーパック板厚算定の直接の要素となつたこともあり、各種腐食試験の継続によるデータの蓄積によって、過剰に保守的とならない腐食量の見積もりを行うことが求められる。また、溶接部腐食試験についても、溶接後の韌性低下や残留応力によって複雑な条件下での腐食挙動となることが予想されることから、より実機に近い条件での腐食速度の検討が求められる。

### (3) 製作性

オーバーパックの製作技術に関しては、現状においても様々な材質、大きさの容器の製造実績を有することから、現状技術で十分対応が可能である。封入溶接はガラス固化体が直接曝露する放射線下の作業となることから遠隔自動化が必要となるが、すでに実用化されている技術であり、溶接部の仕様が決定すれば対応可能である。

封入継手の位置と形状については、本検討では施工時間の短縮化と内部ガラス固化体への熱影響を考慮し設定したが、取り合い形状は本検討のような厚肉構造の場合、溶接後に高い拘束力が発生する。オーバーパックにかかる荷重は外圧のみであり、4.1 項の基本形状の検討で示したように継手を胴部側面に直径方向に配置した支圧構造とすることも一つの候補となる。いずれの形状が最適かは今後溶接設計を進める中で検討されるべきと考えられる。また、溶接深さについても、支圧面で外圧を支える場合全板厚に渡る必要はなくなり、腐食代分のみとすることも可能であると考えられ、今後の検討課題である。

この部分の詳細溶接構造は溶接方法、溶接作業性およびコスト、非破壊検査性、などに密接に関係するため、それらを総合的に判断し決定されるべきと考えられる。

### (4) 非破壊検査

オーバーパックの非破壊検査は超音波探傷検査が適用性がある。封入溶接と同様放射線下の作業となるため遠隔自動化が要求される。装置の開発にあたってはオーバーパックに対する破壊力学的な評価などから、その長期の健全性を担保するうえで検出が必要となる欠陥の大きさを定量化し、検査の要求精度を明確化する必要がある。この結果に基づき、超音波による欠陥の検出性に影響を与えると考えられる開先形状や溶接の方法、溶接条件（結晶粒径に差が生じ超音波の伝播に影響する）などをパラメータとした、各種の人工欠陥付試験片に対して実証を行い、溶接設計の最適化を図ることが重要となる。また技術的には、欠陥量を定量化するための測定手法の開発、探触子の耐放射線性や耐熱性がの向上などが必要となる。

また、オーバーパックは腐食代を見込んだ構造になっていることから、欠陥検出限界の設定にあたっては構造的要求を満足することと合わせ、腐食代との関係、すなわちその位置と方向に注意し、検出できない欠陥によって早期の貫通が無いよう考慮することも重要となる。

## 参考文献

動力炉・核燃料開発事業団（1992）：高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成3年度－，PNC TN1410 92-081

本間信之，千葉恭彦，棚井憲治（1999a）：チタン一炭素鋼 複合オーバーパックの試作，サイクル機構技術資料，JNC-TN 8400 99-048

本間信之，千葉恭彦，棚井憲治（1999b）：銅一炭素鋼 複合オーバーパックの試作，サイクル機構技術資料，JNC-TN 8400 99-049

高治一彦，杉野弘幸，奥津一夫，三浦一彦，田部井和人，納田勝，高橋真一，杉江茂彦（1999）：ニアフィールドの長期構造安定性評価，サイクル機構技術資料，JNC-TN 8400 99-043

高治一彦，鈴木英明（1999）：緩衝材の静的力学特性，サイクル機構技術資料，JNC-TN 8400 99-041

須田久美子，Sudhir, M., 本橋賢一（1992）：腐食ひびわれ発生限界腐食量に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14, No.1, pp.751-756.

Pourbaix, M. (1966) : Atlas of Electrochemical Equilibria, Pergamon Press.

Nagra (1993) : Kristallin-1 ; Safety Assessment Report, Nagra Technical Report NTB 93-22, Nagra Wettingen, Switzerland.

電力中央研究所・電気事業連合会（1999）：高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術.

石川博久，本田明，鶴留浩二，井上邦博，小畠政道，佐々木憲明（1992）：オーバーパック候補材料選定と炭素鋼オーバーパックの寿命評価，動燃技術資料，PNC-TN 8410 92-139.

本田明，谷口直樹，石川博久，藤原和雄（1997a）：低溶存酸素濃度下における炭素鋼の腐食挙動の実験的検討，動燃技報 No.104, pp.125-134.

本田明，谷口直樹，濱田啓志，石川博久（1997b）：オーバーパック候補材料の長期寿命評価の考え方と評価の現状，第44回材料と環境討論会講演集 pp.401-404.

Simpson, J.P. and Valloton, P.H. (1984) : Experiments on Container Materials for Swiss High-Level Waste Disposal Projects Part IV, NAGRA Technical Report 86-25.

Marsh, G.P., Bland, I.D., Taylor, K.J. Sharland, S. and Tasker, P. (1986) : An Assessment of Carbon Steel Overpacks for Radioactive Waste Disposal, EUR10437.

谷口直樹, 本田明, 川崎学, 水流徹 (1999a) : 圧縮ベントナイト中における炭素鋼の腐食形態と腐食速度の評価, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-003.

本田明, 谷口直樹 (1999) : 銅オーバーパックの寿命評価, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-028.

鈴木角成, 伏見公志, 安住和久, 瀬尾眞浩 (1997) : 腐食に伴う炭素鋼表面微細形態変化のAFM観察, 第44回材料と環境討論会講演集, D-112.

谷口直樹, 本田明, 川崎学, 森田光男, 森本昌孝, 油井三和 (1999b) : 炭素鋼オーバーパックにおける腐食の局在化の検討, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-067.

炭山守男, 玉田明宏, 三ツ井誠一郎, 本田明 (1997) : ベントナイト中の炭素鋼オーバーパックの腐食挙動に関するナチュラルアナログ研究, 第44回材料と環境討論会講演集, p417.

Johnson, A.B. and Francis, B. (1980) : Durability of Metals from Archaeological Objects, Metal Meteorites and Native Metals, Battelle Pacific Northwest Laboratory, PNL-3198.

Araki, K., Motegi, M., Emoto, Y., Kaji, Y., Iraki, S., Nada T. and Watanabe, T. (1989) : Natural Analogue Study on Engineered Barriers for Underground Disposal of Radioactive Wastes, ASME'89 proceedings, pp.601-609.

Taniguchi, N., Honda, A. and Ishikawa, H. (1998) : Experimental Investigation of Passivation Behavior and Corrosion Rate of Carbon Steel in Compacted Bentonite, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.506 495-501.

内藤守正, 石原義尚, 梅木博之, 本田明, 谷口直樹, 沢村英範, 西村和哉 (1999) 高レベル放射性廃棄物地層処分システムのニアフィールドにおける放射線影響の検討, サイクル機構技術, JNC-TN 1400 99-025

Briesmeister, J.F. (ed.) (1993) : MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A, LA-12625-M.

Ganapol, B.D., Wemple, C.A. and Jahshan, S.N. (1994) : An MCNP Benchmark for Two Adjacent Half-Space, Trans.Am.Nucl.Soc., vol.70, pp.150-152.

Wemple, C.A., Jahshan, S.N. and Ganapol, B.D. (1992a) : An Analytical Two-Dimensional Neutron Transport Benchmark of the MCNP code, Trans. Am. Nucl. Soc., vol.65, pp.238-240.

Wemple, C.A., Jahshan, S.N. and Ganapol, B.D. (1992b) : Analytical Infinite Medium Neutron Spectrum Benchmark of the MCNP Code, Trans. Am. Nucl. Soc., vol.66, pp.281-283.

Estes, G.P., Urban, W.T. and Heath, A.R. (1985) : Photon Shielding Calculations for a Radiation Waste Facility Benchmark, Trans.Am.Nucl.Soc., vol.50, pp.477-479.

Lu, A.H., Schwarz, R.A. and Simons, R.L. (1991) : Benchmark Calculations for FFTF Inner Radial Shield Damage Rates, US DOE Rep. WHC-SA-1429.

Broadhead, B.L. and Parks, C.V. (1991) : Scale-4 Shipping Cask Shielding Applications, US DOE Rep, CONF-9109217-3.

Ueki, K., Nakazawa, M., Hattori, S., Ozaki, S., Tamaki, H., Kadotani, H., Ishizuka, T. and Ishikawa, S. (1992) : Experimental and Analytical Study for Demonstration Program on Shielding of Casks for High-Level Wastes, Proc.10th Int.Symp. Packag. Transp. Radioact.Master. 1992, vol.2, pp.692-701.

杉野弘幸, 藤田朝雄, 谷口航, 長谷川宏, 岩佐健吾 (1999) : 緩衝材設計の考え方, サイクル機構技術資料, JNC-TN 8400 99-096

Marsh, G.P., Harker, A.H. and Taylor, K.J. (1989) : Corrosion, vol.45, No.7.

Marsh, G.P. (1990) : Progress in the Assessment of the Corrosion of Low and Intermediate Level Waste Containers under Repository Conditions, NSS/R126.

谷口直樹, 本田明, 川崎学 (1994) : 圧縮ベントナイト中における炭素鋼オーバーパックの局部腐食進展期間の評価, 第 41 回腐食防食討論会講演集, p.267.

Porter, L.F. (1960) : Radiation Effects in Steel, ASTM Special Publication No.276, Materials in Nuclear Applications, American Society for Testing Materials, Philadelphia, Pa, pp.163-174.

Börgesson, L. (1992) : Interaction between Rock, Bentonite Buffer and Canister. FEM Calculations of Some Mechanical Effects on the Canister in Different Disposal Concepts, SKB Technical Report 92-30.

Werme, L. (1998) : Design Premises for Canister for Spent Nuclear Fuel, SKB Technical Report TR-98-08

Raiko, H. and Salo, J-P. (1999) : Design Report of the Disposal Canister for Twelve Fuel Assemblies, POSIVA 99-18

本田明, 鶴留浩二, 野高昌之, 井上邦博, 石川博久, 佐々木憲明 (1992) : 炭素鋼オーバーパックの試作, 動燃技術資料, PNC TN1410 92-059.