PNC TN1211 98-004

複合オーバーパックの設計研究（Ⅱ）

（動力炉・核燃料開発事業団　研究委託成果報告書）

1998年2月

三菱マテリアル株式会社

この資料は，動燃事業団の開発業務を進めるため，限られた関係者だけに配布するものです。従って，その取扱には十分注意を払って下さい。なお，この資料の供覧，複製，転載，引用等には事業団の承諾が必要です。また今回の配布目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

This document is not intended for publication. No public reference nor disclosure to the third party should be made without prior written consent of Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

本資料についての問合せは下記に願います。

〒107-0052　東京都港区赤坂１－９－13

動力炉・核燃料開発事業団

技術管理部　技術情報室

PNC TN1211 98-004
1998年　2月

複合オーバーパックの設計研究（Ⅱ）

大迫顕彦*, 田中宏和*, 橋本知彦*, 下田收*

要　旨

高レベル放射性廃棄物地層処分の研究開発においては、人工バリアに要求される性能を確保し得る技術的方法を明らかにするため、人工バリアの設計、製作及び施工に関する工学的検討が行われている。

現在、人工バリアの構成要素の一つであるオーバーパックについては、炭素鋼単体構造からなる炭素鋼オーバーパックと、構造強度を維持するための炭素鋼本体にチタン、銅などによる耐食層を設けた二重構造からなる複合オーバーパックという二つのの概念が示されており、それぞれに対してその機能性、施工性の面から検討が進められている。

本委託研究では、銅を用いた複合オーバーパックについて海外における検討事例の調査および銅材料に関する調査とオーバーパック耐圧強度に関する検討等を実施し、これに基づいた構造概念の構築を行った上、詳細設計を実施した。次に、品質管理に関する検討ならびに放射線損傷に関する検討を行った。

本報告書は、三菱マテリアル株式会社が動力炉・核燃料開発事業団殿の委託により実施した研究内容である。

契約番号　：　090D0306

事業団担当部課室及び担当者　：

東海事業所　環境技術開発部　地層処分開発室（GIS）千葉恭彦殿

＊：　三菱マテリアル株式会社　原子力事業センター

PNC TN1211 98-004
February, 1998

Design Study of Composite Overpack(Ⅱ)

Akihiko Osako*
Hirokazu Tanaka*
Tomohiko Hashimoto*
Atsumu Simoda*

Summary

The engineering study has been performed concerning the design, manufacturing and construction of the engineering barrier in order to clarify the engineering method that can secure performances required to the engineering barrier in the field of R & D for high-level radioactive waste geological disposal.

The two concepts have been indicated and discussed their functions and manufacturing respectively so far. One of them is the carbon steel overpack simply structured from carbon steel. Another one is double structured composite overpack having corrosion free layer such as titanium or copper onto the carbon steel body which is expected to maintain the structural intensity.

This report presents the results of research on many cases of composite overpacks using copper material studied in oversea countries, and also gives the results of analyses on stress intensity of overpack, followed by detail design after making conceptual design based on those results. In the next place, studies of quality control and radiation damage to overpack have been carried out.

Work performed by Mitsubishi Material Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation(PNC).

Contract No. 090D0306
PNC Liaison : Geological Isolation Technology Section
Waste Technology Development Division
Takahiko Chiba

* :Nuclear Engineering Center

目　次

1．はじめに ---------- 1
2．海外における検討事例調査 ---------- 2
2.1　スウェーデン ---------- 2
2.2　カナダ ---------- 10
2.3　アメリカ ---------- 13
2.4　まとめ ---------- 19
3．銅材料に関する調査 ---------- 21
3.1　銅及び銅合金の種類 ---------- 21
3.2　銅の特徴 ---------- 26
3.3　銅及び銅合金の加工性 ---------- 31
3.4　オーバーパックに用いる銅材料 ---------- 38
3.5　銅の埋蔵量と最近の需要動向 ---------- 41
4．オーバーパック耐圧強度に関する検討 ---------- 44
4.1　MITI 告示 501 号と ASME Sec.Ⅲとの相違点について ---------- 44
4.2　オーバーパックの設計・解析に関する考え方について ---------- 47
4.3　安全率の設定に向けた方向付けの検討 ---------- 54
4.4　設計手法の確立に向けた方向付けの検討 ---------- 56
5．銅－炭素鋼複合オーバーパックの設計 ---------- 58
5.1　構造概念の構築 ---------- 58
5.2　詳細設計 ---------- 79
6．オーバーパックの品質管理に関する検討 ---------- 100
6.1　オーバーパック製作に関わる品質管理項目 ---------- 100
6.2　オーバーパック溶接部の検査法 ---------- 102
6.3　放射能濃度の確認方法 ---------- 109
7．オーバーパックの放射線損傷に関する検討 ---------- 112
7.1　はじめに ---------- 112
7.2　dpa（displacement per atom；材料原子当たりのはじき出し数） ---------- 112
7.3　オーバーパックの炭素鋼の dpa ---------- 116

7.4 オーバーパックの炭素鋼の放射線損傷 ---------- 132
7.5 まとめ ---------- 134
8．参考文献 ---------- 135
参考資料1 ---------- 137
参考資料2 ---------- 138

表 目 次

表 2.1－1　埋設燃料の特性及び寸法 ---------- 2
表 2.1－2　銅材選定理由 ---------- 7
表 2.4－1　海外における銅処分容器の検討一覧 ---------- 20
表 3.1－1　合金番号の表し方 ---------- 21
表 3.1－2　伸銅品の合金別分類と名称 ---------- 22
表 3.1－3 (1)　伸銅品(JIS 製品)種類名称及び化学成分表 ---------- 23
表 3.1－3 (2)　伸銅品(JIS 製品)種類名称及び化学成分表 ---------- 24
表 3.1－3 (3)　伸銅品(JIS 製品)種類名称及び化学成分表 ---------- 25
表 3.2－1　純銅の物理的・機械的性質 ---------- 26
表 3.2－2　純銅の体積抵抗率と熱伝導率・比熱の温度依存性 ---------- 26
表 3.2－3 (1)　各種銅合金の物理的性質(JIS 合金) ---------- 27
表 3.2－3 (2)　各種銅合金の物理的性質(JIS 合金) ---------- 28
表 3.2－4　銅の特性を利用した用途 ---------- 29
表 3.2－5　銅中の拡散の活性化エネルギーとエントロピー項 ---------- 31
表 3.3－1 (1)　各種銅及び銅合金の板・条の加工特性と主な用途 ---------- 32
表 3.3－1 (2)　各種銅及び銅合金の板・条の加工特性と主な用途 ---------- 33
表 3.3－2　銅及び銅合金の溶接特性 ---------- 35
表 3.4－1　脱亜鉛腐食感受性試験結果の一例 ---------- 39
表 3.5－1　世界の銅の埋蔵量 ---------- 41
表 3.5－2　世界の銅地金生産量 ---------- 42
表 3.5－3　日本の銅地金の需給動向 ---------- 42
表 3.5－4　日本の伸銅品の需給動向 ---------- 43
表 5.1－1　オーバーパックの形状による比較 ---------- 58
表 5.1－2　銅－炭素鋼複合オーバーパックへ適応する ---------- 61
代表的被膜加工技術
表 5.1－3　銅－炭素鋼複合オーバーパックへ適応する ---------- 62
熱間等方圧加圧(HIP)法
表 5.1－4　爆着加工技術の銅に対する適応性について ---------- 64

表 5.1－5 (1)　外容器円筒の加工方法(1) ---------- 66
表 5.1－5 (2)　外容器円筒の加工方法(2) ---------- 67
表 5.1－6 (1)　主な溶接方法の比較(1) ---------- 67
表 5.1－6 (2)　主な溶接方法の比較(2) ---------- 68
表 5.1－7　加工手順の比較 ---------- 69
表 5.1－8　外容器加工方法の比較 ---------- 71
表 5.1－9　各ハンドリング機構の比較 ---------- 74
表 5.1－10　本体と蓋の接合方法による比較 ---------- 75
表 5.2－1　内容器(炭素鋼製容器)強度計算式及び計算結果 ---------- 88
表 5.2－2　縦置きの場合の応力評価結果 ---------- 96
表 5.2－3　横置きの場合の応力評価結果 ---------- 98
表 6.2－1　主な漏洩試験方法 ---------- 105
表 7.2－1　ガンマ線に対する鉄のはじき出し断面積 ---------- 114
表 7.3－1　ガラス固化体の仕様 ---------- 119
表 7.3－2　ガンマ線エネルギースペクトル(DLC-23E 群構造) ---------- 119
表 7.3－3　中性子線エネルギースペクトル(DLC-23E 群構造) ---------- 120
表 7.3－4 (1)　計算に使用した物質の密度及び密度(1) ---------- 122
表 7.3－4 (2)　計算に使用した物質の密度及び密度(2) ---------- 123
表 7.3－5　ガンマ線源のフラックス計算結果 ---------- 125
表 7.3－6　中性子線源の各計算ケースにおける全フラックス計算結果 ---------- 126
表 7.3－7 (1)　中性子線源のフラックス計算結果(1) ---------- 127
表 7.3－7 (2)　中性子線源のフラックス計算結果(2) ---------- 128
表 7.3－7 (3)　中性子線源のフラックス計算結果(3) ---------- 129
表 7.3－8　DLC-23E 群構造に対応する鉄電子当りのはじき出し断面積 ---------- 133

図 目 次

図 2.1－1　鋳造インサートを装着時の銅製キャニスターの概念図 ---------- 5

図 2.1－2　キャニスター概念設計図（BWR 用） ---------- 6

図 2.2－1　カナダにおける処分容器概念図 ---------- 11

図 2.2－2　処分容器概念設計図 ---------- 12

図 2.3－1　二重壁コンテナ概念図 ---------- 14

図 2.3－2　遠心鋳造によるバイメタル試験円筒 ---------- 17

図 2.3－3　試作円筒の断面写真 ---------- 17

図 2.3－4　連続鋳造中のミキシング評価 ---------- 18

図 3.3－1　銅中への水素溶解度と温度との関係 ---------- 34

図 3.3－2　MIG 溶接法の原理 ---------- 37

図 3.3－3　電子ビーム溶接装置の概略 ---------- 37

図 3.3－4　CO_2 ガスレーザ溶接装置の概略 ---------- 37

図 3.4－1　Cu-Zn 合金の物理的性質と Zn の蒸発温度 ---------- 39

図 3.4－2　70-30 黄銅の 50%加工材を焼なましたときの ---------- 39
機械的性質の変化(30 分間焼なまし)

図 3.4－3　アンモニア蒸気中における各種銅合金の応力腐食割れ感受性 ---------- 39

図 5.1－1　複合材曲げ加工を用いた手順例フロー図 ---------- 60

図 5.1－2　被膜加工を用いた加工手順例フロー図 ---------- 60

図 5.1－3　熱間等方圧加圧(HIP)を用いた加工手順例フロー図 ---------- 62

図 5.1－4　爆着を用いた加工手順例フロー図 ---------- 64

図 5.1－5　焼きばめを用いた加工手順例フロー図 ---------- 65

図 5.1－6　内層・外層を別構造とした加工手順例フロー図 ---------- 65

図 5.1－7　外層蓋部継ぎ目の溶接箇所概念図 ---------- 70

図 5.1－8　円筒部溶接箇所の超音波探傷の検出方法 ---------- 72

図 5.1－9　スカート方式の概念図 ---------- 73

図 5.1－10　既研究における脱着方式概念図 ---------- 75

図 5.1－11　脱着式ハンドリング治具概念図 ---------- 75

図 5.1－12　縦置き姿勢時の埋設手順(例) ---------- 76

図 5.1－13　横置き姿勢時の埋設手順(例) ---------- 76
図 5.1－14　内容器の構造による寸法差 ---------- 77
図 5.1－15　内容器を溶接構造とした場合とボルト止め構造とした場合の ---------- 78
加工手順例フロー図
図 5.2－1　内容器及び外容器 ---------- 80
図 5.2－2　肉厚計算モデル ---------- 84
図 5.2－3　インロー部強度評価モデル ---------- 85
図 5.2－4　外容器上部模式図 ---------- 86
図 5.2－5　インロー部模式図 ---------- 87
図 5.2－6　銅容器底の応力評価 ---------- 89
図 5.2－7　吊上げ部模式図 ---------- 89
図 5.2－8　吊上げ部の穴の模式図 ---------- 90
図 5.2－9　オーバーパックの詳細図 ---------- 91
図 5.2－10　製作・組立て・検査手順の概念 ---------- 92
図 5.2－11　縦置き解析モデル図 ---------- 94
図 5.2－12　縦置きの場合の解析結果 ---------- 95
図 5.2－13　横置き解析モデル図 ---------- 97
図 5.2－14　横置きの場合の解析結果 ---------- 99
図 6.2－1　超音波探傷試験方法の種類 ---------- 103
図 6.2－2　検査結果の表示方法 ---------- 103
図 6.2－3　ヘリウムリークデテクターの原理 ---------- 106
図 7.2－1　ガンマ線に対する鉄のはじき出し断面積 ---------- 115
図 7.2－2　中性子エネルギーの関数としてプロットされた ---------- 115
鉄のはじき出し断面積
図 7.3－1　フラックス計算モデル(円筒体系) ---------- 121
図 7.4－1　中性子照射損傷によって引き起こされる DBTT 変化 ---------- 133
図－参1　参考文献1に記載された BWR 及び PWR 燃料用 ---------- 138
インサートの形状
図－参2　インサート外周からチャンネルまでの距離の設定位置 ---------- 138

１．はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分の研究開発においては、人工バリアに要求される性能を確保し得る技術的方法を明らかにするため、人工バリアの設計、製作及び施工に関する工学的検討が行われている。

現在、人工バリアの構成要素の一つであるオーバーパックについては、炭素鋼単体構造からなる炭素鋼オーバーパックと、構造強度を維持するための炭素鋼本体にチタン、銅などによる耐食層を設けた二重構造からなる複合オーバーパックという二つのの概念が示されており、それぞれに対してその機能性、施工性の面から検討が進められている。

本委託研究では、銅を用いた複合オーバーパックについて海外における検討事例の調査および銅材料に関する調査とオーバーパック耐圧強度に関する検討等を実施し、これに基づいた構造概念の構築を行った上、詳細設計を実施した。次に、品質管理に関する検討ならびに放射線損傷に関する検討を行った。

2．海外における検討事例調査

海外において放射性廃棄物（使用済み燃料、ガラス固化体）地層処分における最終処分容器の候補材料として銅を検討しているスウェーデン、カナダ、アメリカについて調査を行った。以下これらの調査結果を国別にまとめる。

2.1 スウェーデン

スウェーデンでは使用済み燃料の最終処分容器の材料として銅を最も有力な候補材料として研究が行われている。スウェーデンの検討については SKB（Swedish Nuclear Fuel and Waste management Company、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社）技術報告書を中心にまとめる。

2.1.1 埋設想定および処分容器に対する要求機能

SKB における地層処分の埋設想定および廃棄物種類、最終処分容器に対する要求機能を以下にまとめる。

(1) 埋設地

廃棄物の埋設地は地下 500m[1]（400m～700m[2]）の岩床を想定しており、地質は花崗岩である。[3]

(2) 処分廃棄物の種類

埋設を想定している燃料の詳細を表 2.1－1 に示す。スウェーデンでは燃料の再処理は行わずに使用済み燃料は集合体のまま BWR 燃料ならばキャニスター１つにつき 12 体、PWR 燃料ならば 4 体収納し埋設するものとしている。[3]

表 2.1－1　埋設燃料の特性及び寸法[3]

FUEL TYPE	BWR	PWR
Total length	4.398m	4.243m
Cross section area	140×140mm^2	214×214mm^2
No. of fuel pins	63-100	15×15　or　17×17
Enrichment (% U-235)	max. 3.6% (with Gd 4.2%)	Max. 4.2%
Burnup (max.)	60MWd/kg U	60MWd/kg U
Burnup (ave.)	38MWd/kg U	38MWd/kg U
Decay time (min.)	30 years	30 years
Residual power/bundle	100-150 W	300-450 W

(3) 処分容器の耐久年数

キャニスターに要求される耐久年数は最低 1,000 年としているが、設計の際の耐久年数は 10,000 年としている。[4]

(4) 処分容器に必要な機械的強度

参考文献(3)では、埋設された処分容器にかかる外部圧力は最大 15MPa を想定している。その内訳は、想定している埋設深さ最大値の 700m に埋設時の静水圧が 7MPa、密度 2000kg/m^3 のベントナイト膨潤による圧力が最大 8MPa であり、合計 15MPa である。また、静水圧とベントナイト膨潤以外に氷河の影響[5](参考資料 1 参照)による圧力上昇は最大 30MPa であり、この時の外部圧力は合計 45MPa となることを予想しているが、これはかなり先の話でありそれまでに放射性核種は減衰しているものと考えられるため、氷河の影響による圧力上昇に対する強度の検討は不必要としている。

参考文献(1)では、前提条件の見直しによって内部キャニスターにかかる圧力は 10MPa に変更されており、その内訳は静水圧 5MPa 及びベントナイトの膨潤による圧力 5MPa としている。

(5) 処分容器外部表面温度上限

キャニスター表面付近の水の蒸発により表面付近の塩濃度の上昇が起こり予想以上の腐食環境になる可能性があるためキャニスター外部表面温度を 90℃以下にする必要があるとしている。[3]

(6) 処分容器の表面線量（遮蔽能力）

キャニスター周辺では、放射線分解による大きな水の化学的変化を引き起こさないようにすることが必要としている。そのため、キャニスターの表面線量は 500mGy/h 以下にするものとしている。

また、キャニスターの表面線量を 500mGy/h(約 600mSv/h)以下にするためには、インサートとキャニスターの厚さを合計 100mm 以上にしなければならないとしている。[3]

(7) 臨界管理

水が侵入した場合でも使用済み燃料が容器内で臨界に達しないように管理・設計することを条件としている。[3]

(8) 銅製キャニスターの厚さ

氷河作用[5](参考資料1参照)の結果、酸素を含んだ水が埋設地に侵入する事が考えられ、埋設期間の内 5000 年で透水係数が 10 倍に増加し、酸素含有量が 45mg/dm^3 となることを想定すると、全腐食深さは 2mm となる。さらに孔食係数を5とすると孔食の深さは 10mm であり安全係数3を用いるとキャニスターの厚さは 30mm となる。腐食に関する観点から、キャニスターの厚さは 30mm 以上必要としている。[3]

2.1.2 銅製処分容器の概要

(1) 処分容器概念図

SKB におけるインサート装着時のキャニスター概念図を図 2.1－1 に示す。また、参考文献(1)で検討された使用済 BWR 燃料用キャニスターの概念設計図を図 2.1－2 に示す。

この容器は、強度保持を目的とする鋳鋼又はダクタイル鋳鉄製インサート及び耐食性を目的とする銅製キャニスターから構成されている。

インサートには燃料チャンネルと呼ばれる燃料集合体収容用の穴があり、各チャンネルの間隔は 50mm となっている。また、インサート外周からチャンネルまでの距離は最短で 50mm である。このインサートを覆っているのがキャニスターであり、厚さは 50mm である。[3](参考資料2参照)

これらインサートとキャニスターは密着しておらず、これらの間には 2mm の隙間が存在する。このギャップによる銅キャニスターの歪みは最大で 4%と評価されている。[3]

また、厚さ 50mm の銅製キャニスターを耐食性の面から評価した耐久年数は 100,000 年としている。[3]

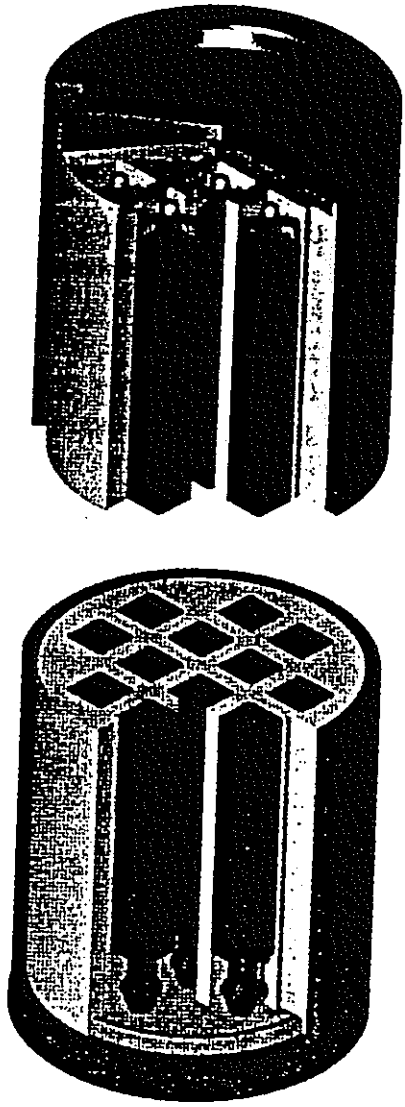


図 2.1－1　鋳造インサートを装着時の銅製キャニスターの概念図[3]

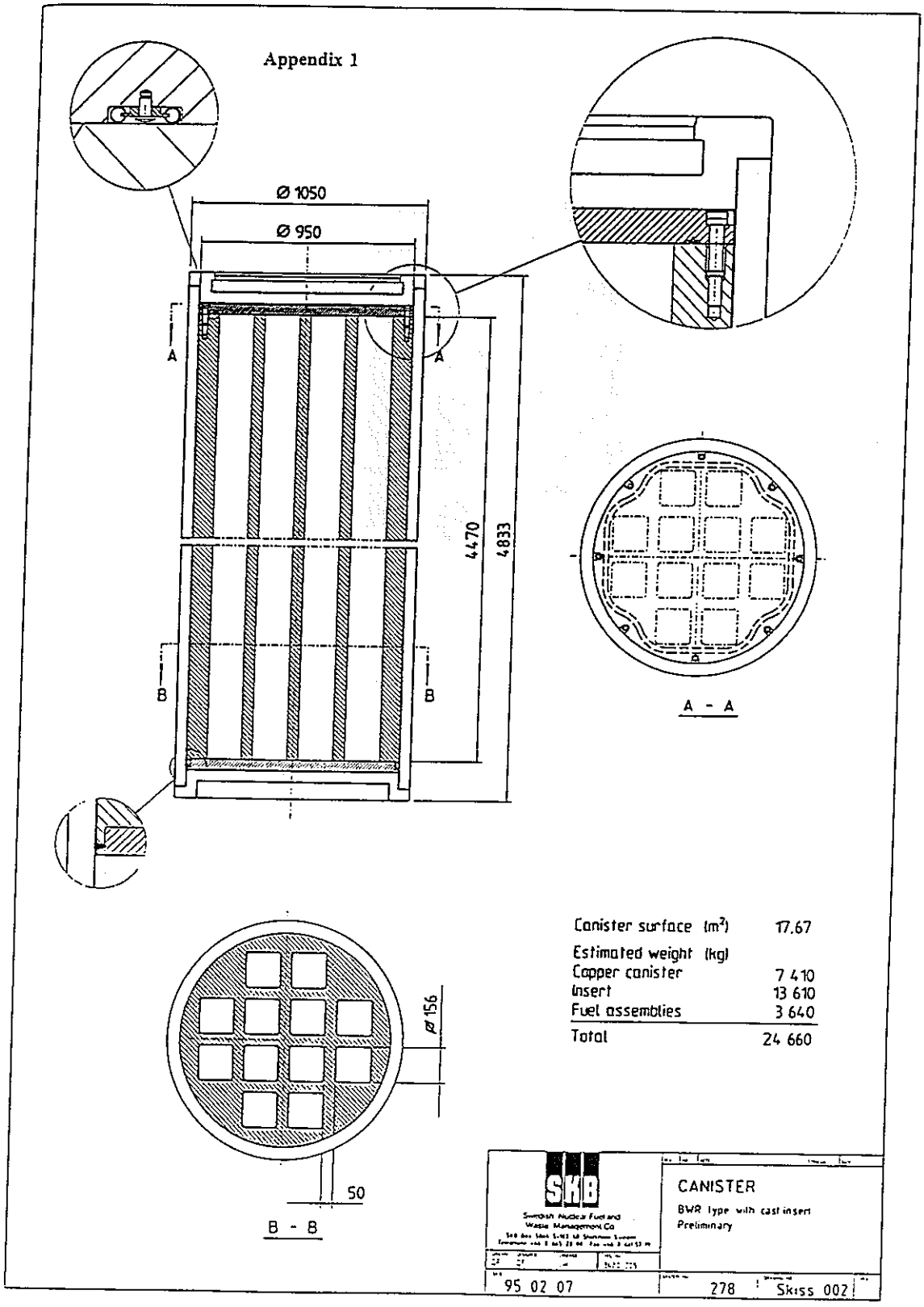


図 2.1－2　キャニスター概念設計図（BWR 用）(1)

(2) 材質

報告書により材料の組成に多少の違いは見られるが、参考文献(3)では、P:40-60ppm、H:＜0.6ppm、S:＜6ppm かつ粒径 180-360μm を付加条件とした UNS C10100（無酸素銅）材をベースの材料がキャニスターのリファレンス材料として検討されている。上記材料組成の選定理由を表 2.1－2 に示す。

材質のベースとして選定されている無酸素銅に関して、高温でのクリープ特性が良い[6]、電子ビーム溶接性が良い[4]などが研究結果として挙げられている。

又、インサートの参考材料として、ダクタイル鋳鉄 Swedish Standard 140717-00 および鋳鋼 Swedish Standard 141309-02 の 2 種類が検討されている。[3]

表 2.1－2 銅材選定理由

要求項目	理由
O＜10ppm[2]	濃度が高いと溶接性が低下するため[4]
H＜0.6ppm	濃度が高いと機械的特性が悪化するため（水素脆性）
S＜6ppm	濃度が高いと結晶粒界に濃縮された硫黄の析出により、機械的特性が悪化するため
P：40～60ppm	この濃度範囲の P は S の影響を低減するとともに、クリープ延性を増し、再結晶温度を上げ、溶接性にあまり悪影響を与えないため[2]
結晶粒径 180～360μm	この粒径範囲では、50mm 厚銅の超音波試験において X 線試験と同等の結果が得られるため[2]

2.1.3 銅製処分容器の製造方法

SKB では、キャニスターインサートは鋳造による製造を検討している。また、銅製キャニスターの円筒部分は複数の加工方法について検討を行っている。

以下に銅製キャニスター円筒部の加工方法および現状についてまとめる。

(1) 銅プレートの半円筒形状への圧延成形＋電子ビーム溶接

銅プレートを圧延成形により半円筒の形状に加工し、それらを電子ビームで溶接することによって円筒形状の銅製キャニスターを製作する手法。

SKB では、この手法を用いて 1995 年にフルスケールの試作を行った。その結果、実質的なレベルでの材料組織は条件を満たしており、実用化は可能としている。[3]

(2) 熱間押し出し

この手法についても SKB において、1995 年にフルスケールの試作が行われた。熱間押し出しによる試作は 800℃の温度条件で行われ、その結果、直線性、円筒度は良いが、結晶粒径が粗大化する結果が得られた。このときの平均結晶粒径は 800～1000 μm で最大 2000 μm であった。しかし、押し出し温度を下げることにより粒径が小さくなることが分かっており、パラメーター条件を研究中である。

この試作では求められる条件を完全には、満たせなかったが、粒径を小さくできる見通しはあり、実用化の可能性はあるとしている。[3]

(3) 熱間等方圧加圧（Hot Isostatic Pressing）

フルスケールのキャニスターを製造できる施設がなかったため、実験室規模の試験が行われた。550℃、100MPa、プレス時間が 1 時間の条件下での試験の結果、粒径 4～40 μm の最密に近い、延性特性の良い銅ができることが確認された。良い機械的特性を得るために粉体表面の酸素を除去しなければならない。350℃の水素雰囲気中で処理することで、銅粉体表面の酸素を除去することができるが、酸素除去によって水が生成される可能性があることを問題点としている。以上のように、まだ研究の余地はあるが将来的には実用化される可能性があるとしている。[3]

(4) 電着

HIP と同様、1996 年の段階ではフルスケールのキャニスターを製造できる施設がなかった。電着法の特徴として、インサートとキャニスター間のギャップが存在しないことが挙げられる。このことによりキャニスターに要求される機械的特性が緩和されると考えられている。また、プロセスのパラメーター及びその後の熱処理で組成をかなりの範囲で操作できると考えられているが、実験室規模の評価が必要としている。

HIP と同様、まだ研究の余地はあるが、将来的には実用化される候補の一つとして考えられている。[3]

(5) 溶射

試験では、偏析がなく等軸構造の微細組織が観察された。溶射では、溶融金属の吹き付けに窒素を用いるが、SKB で検討されている銅は窒素に対して不溶解でかつ窒化物を形成する元素を含まないため、材料中に窒素が入り気孔ができてしまう欠点がある。しかしながら、材料が Zr のような窒素との強い結合性のある元素を含む場合、無孔の材料ができ有効としている。

HIP、電着と同様に材料特性の調査を含めた長時間の実験室規模の試験が必要としている。[3]

試作における各部溶接は 1kPa 程度に減圧して、電子ビーム溶接で行おなわれた。電子ビーム銃は、1986-1992 年の EUREKA プロジェクトで開発されたものが使用された。[3]

2.2 カナダ

2.2.1 埋設想定および処分容器に対する要求機能

カナダの AECL(Atomic Energy of Canada Ltd.、カナダ原子力公社)では、使用済燃料処分容器の材質としてチタンを第一候補に考えている。銅は、チタンを採用できなかった場合のオプションとしての位置付けとなっている。カナダにおいて検討されている地層処分の埋設想定および廃棄物種類、最終処分容器に対する要求機能を以下にまとめる。

(1) 埋設地

廃棄物埋設地は地下 500m～1000mカナダ盾状地の深成火成岩を想定している。[7]

(2) 処分廃棄物の種類

処分廃棄物は CANDU 炉使用済み燃料としている。また、処分容器 1 つにつき 72 バンドル収容するものとしている。[8]

(3) 処分容器の耐久年数

コンテナに求められる耐久年数は少なくとも 300～500 年は必要としている。[7]

(4) 処分容器に必要な機械的強度

静水圧 9.8MPa に耐えることを条件としている。[8]

(5) 埋設地温度

参考文献(7)では、埋設地の最大温度は 100℃と想定している。また、参考文献(8)では、コンテナ表面温度は 150℃になるとしている。

2.2.2 銅製処分容器の概要

カナダにおいて検討された銅を用いた使用済み燃料最終処分容器の概念図[9]と設計図[8]を図 2.2－1 と図 2.2－2 に示す。

図 2.2－1、図 2.2－2 ともに銅コンテナの厚さは 25mm としている。また、この厚さでの、銅製コンテナの耐久年数は 30,000 年以上と評価している。[7]

円筒部の材質には、無酸素銅（UNS C10100）を用いている。[8]

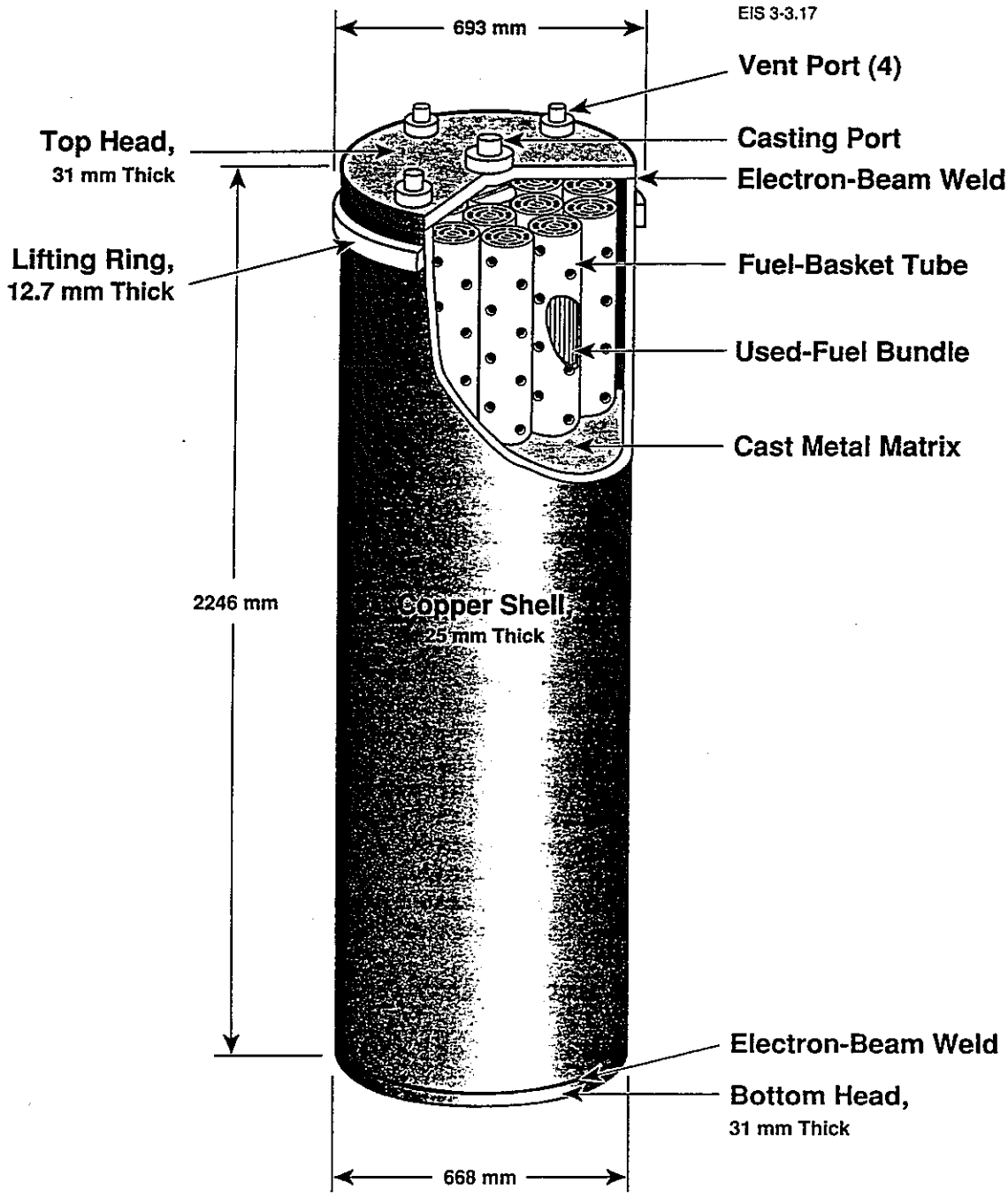
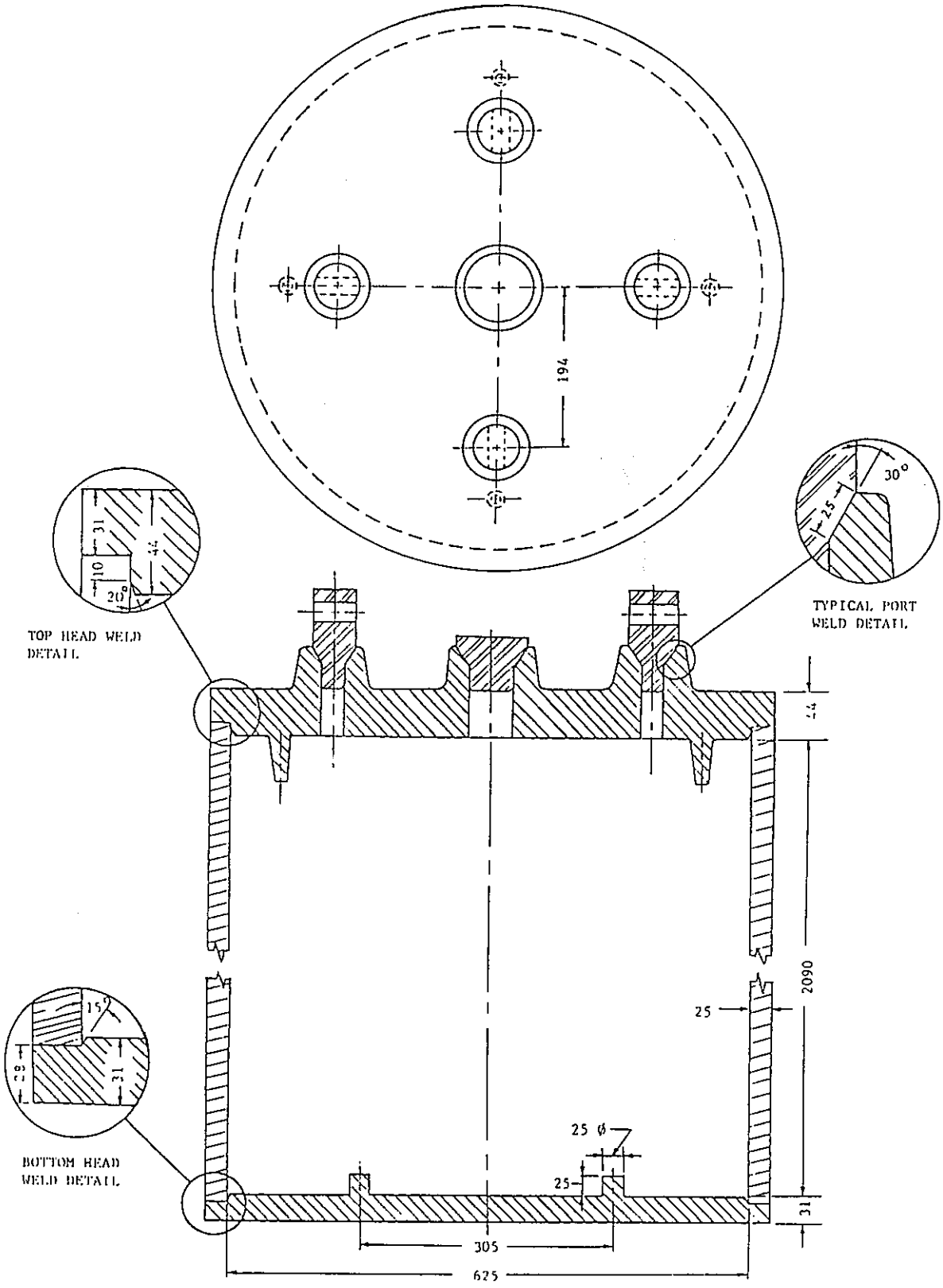


図 2.2－1　カナダにおける処分容器概念図[9]



Conceptual Design of Copper Shell Metal Matrix Container. (Dimensions in mm).

図 2.2－2　処分容器概念設計図[8]

2.3 アメリカ

2.3.1 埋設想定および処分容器に対する要求機能

アメリカでは、ステンレス鋼・ニッケル合金・銅等、種々の材質について検討が行われているが、現在のところ第一候補を決定するには至っていない。処分容器の材質についてアメリカにおいて検討されている埋設想定および処分容器に対する要求機能についてまとめる。

(1) 埋設地[10]

ネバダ州 Yucca 山を想定しており、地質は凝灰岩である。埋設深さは 300～400m で、これは地下水層より約 200m 上に位置する。

(2) 処分廃棄物の種類

高レベル廃棄物を想定している。

(3) 処分容器の耐久年数[11]

NRC（Nuclear Regulatory Commission）規則 10FCR60 において、放射性核種のコンテナ閉じこめ期間は埋設終了後 300～1000 年と定めている。コンテナの閉じこめ期間に引き続き、年間の人工バリア通過割合は、1000 年後に存在する放射性核種インベントリーの 1000 分の１に制限している。また、同規定では埋設後 50 年は取り出し可能とも定めている。

放射性核種が生活圏に到達する期間として、EPA（Environmental Protection Agency）規則 40CFR19 において、100,000 年と規定している。

(4) 埋設地温度

埋設地の最高温度は 230℃で最低 300 年は水の沸点以上の温度である。[10]

2.3.2 銅製処分容器の概要

(1) 処分容器概念図

アメリカにおける銅製最終処分容器は、二重壁コンテナと単壁バイメタルコンテナの２種類が検討されている。[10] 二重壁コンテナの概念図を図 2.3－１に示す。

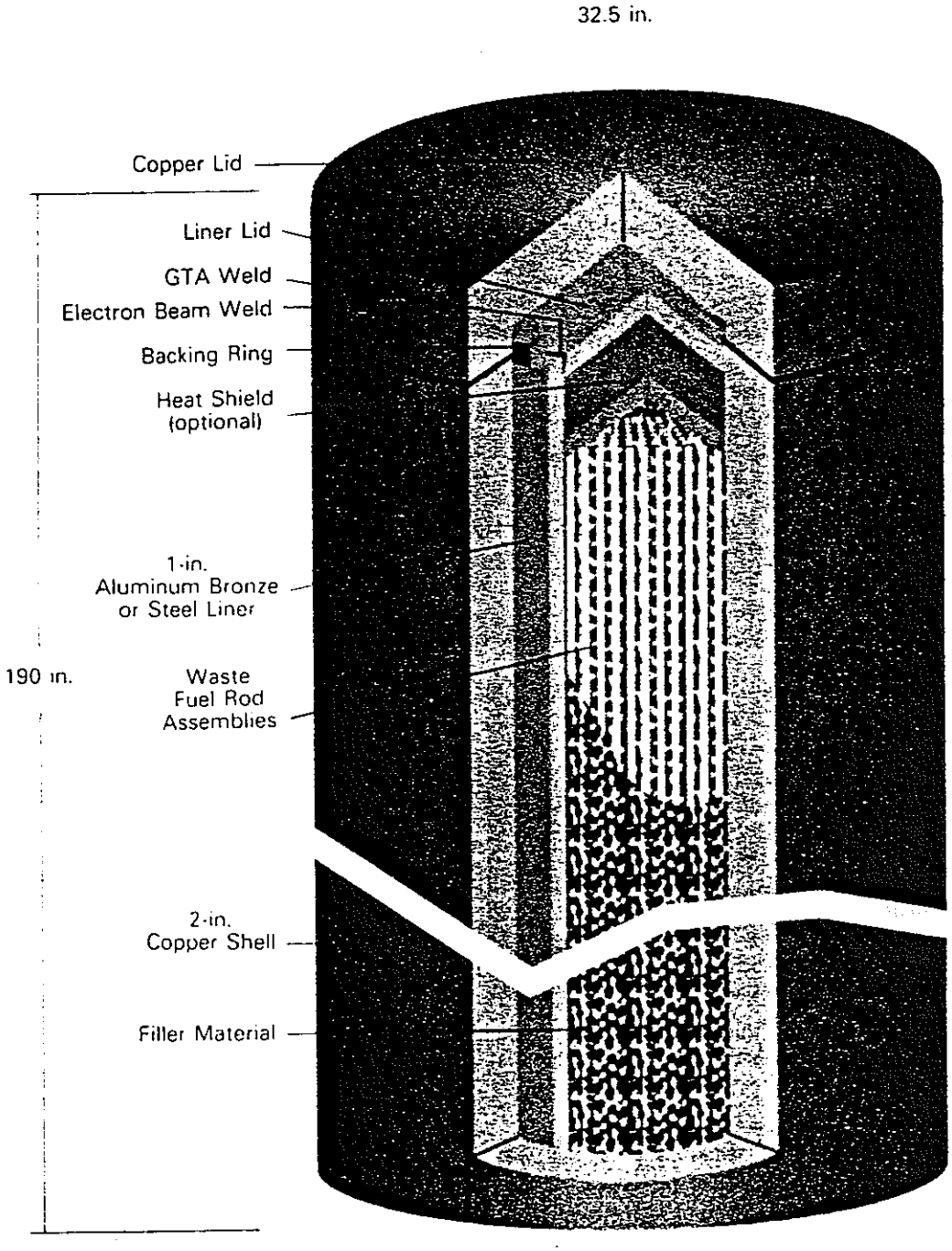


図 2.3－1　二重壁コンテナ概念図 (10)

1993 年段階では最終的な決定ではないとしているが、銅シェルの厚さは 50mm 以上必要としている。[10]

(2) 材質

a. 二重壁コンテナ

・内部コンテナ　アルミニウムブロンズ（UNS C61300）

・外部コンテナ　純銅

b. 単壁バイメタルコンテナ

・シェル内側　ニッケル-アルミニウムブロンズ

・シェル外側　純銅

2.3.3 銅製処分容器の製造方法

コンテナの製造方法についてまとめる。

(1) 二重壁コンテナ[10]

a. 加工方法

圧延成形の後、溶接する。

b. 接合方法(蓋取付け部)

・電子ビーム溶接

熱注入量は最小ではあるが真空中で行わなければならない。しかし、薄いものの溶接ならばアルゴン雰囲気中での減圧だけで可能であると述べている。

・ガスタングステンアーク溶接（GTA）

熱注入量が大きい。防熱シールドを導入する必要が生じる可能性があるとしている。

・摩擦溶接

熱注入量はかなり小さい。熱影響もほとんど残らない。

銅合金の摩擦溶接はすでに行われているがまだ開発は必要としている。

(2) 単壁バイメタルコンテナ[10]

a. 加工方法

遠心鋳造により作製する。参考文献(10)によると、この手法では実機規模の試作は行われていないが、φ825.5mm×457.2mmH、厚さ 76.2mm、重量 360kg 以上の円筒の試作が行われている。この円筒の外観及び断面写真を図 2.3－2 及び図 2.3－3 に示す。

一般に、遠心鋳造には水平方向と垂直方向の 2 方向の鋳造方法がある。実機規模の円筒は水平方向の鋳造によって製作されると考えられているが、遠心鋳造による製造コンセプトの確認試験（円筒の試作）は垂直方向の鋳造にて行われた。

上記試作における円筒の材質は内壁が Ni-Al ブロンズ、外壁が純銅である。Ni-Al ブロンズは純銅と比較して密度が小さく（銅 8.94 に対して 7.53）、融点も低い（銅 1083℃に対して 1043～1060℃）ため、固体純銅と Ni-Al ブロンズを部分的に置換させ接合することはできない。そこで、純銅の注入した後、多少の間隔をおいてからブロンズを注入する連続的な手法で製造したと述べているが、鋳造条件等の詳細については不明である。

試作された円筒の外壁と内壁間における元素のミキシングの程度を調査した結果を図 2.3－4 に示す。この結果より、ミキシングが起こっている領域は検出可能な範囲内であり、アルミニウムの銅中への溶解度が大きく影響している。また、鋳造の条件によりこの範囲をコントロールする事は可能であると考察している。

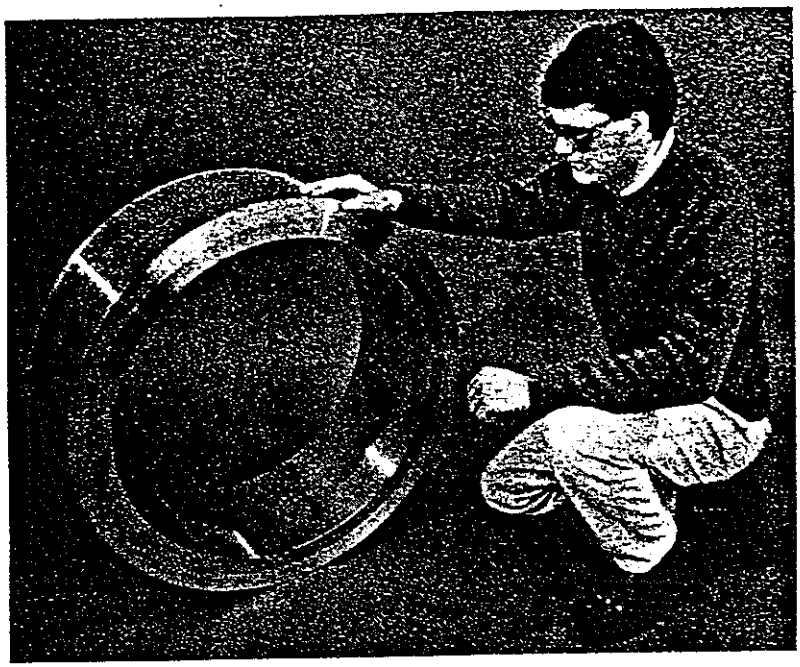
その他、遠心鋳造に特徴的な事柄を以下に示す。

- 遠心力により金属より軽い酸素のような不純物は内壁表面に析出する。従って、このような不純物は機械的作業によって除去が可能である。
- 純銅の結晶粒の形状は、外径側のチル部から内部へと成長する円柱状の結晶粒が形成される。

b. 接合方法(蓋取付け部)

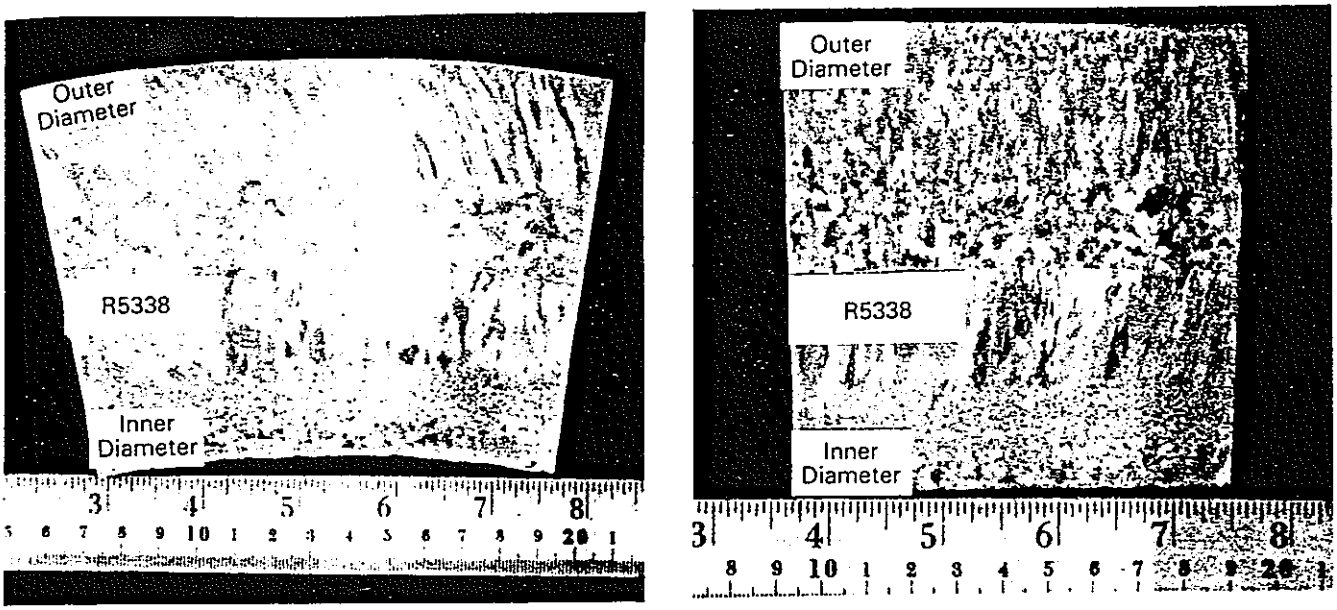
内部コンテナ（ブロンズ）の蓋及び底部を円筒部に接合する方法は、機械的な密閉（ボルト締め）または溶接、あるいはその両方としている。

外部コンテナ（銅）については GTA 又は電子ビーム溶接としている。



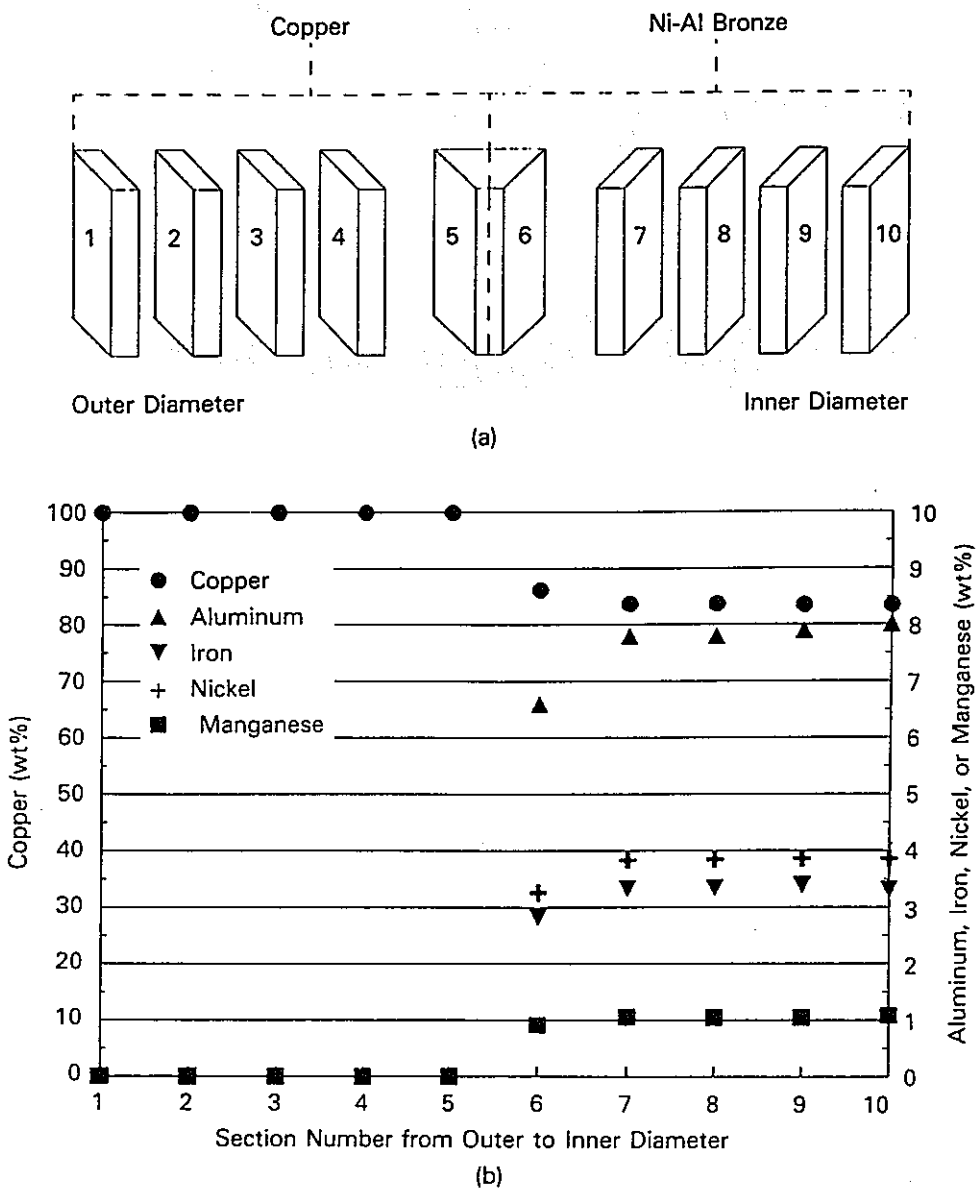
Centrifugally cast bimetallic test ring. The inner shell is Ni-Al bronze; the outer shell is pure copper.

図 2.3－2　遠心鋳造によるバイメタル試験円筒[10]



Macrographs of the bimetallic casting showing copper-bronze interface: (a) axial and (b) tangential views. Note the absence of porosity.

図 2.3－3　試作円筒の断面写真[10]



Evidence of mixing during consecutive casting: (a) sample layout and (b) results of analysis. Note the breadth of the aluminum dilution region.

図 2.3－4　連続鋳造中のミキシング評価[10]

2.4 まとめ

放射性廃棄物地層処分における最終処分容器の候補材料として銅を検討しているスウェーデン、カナダ、アメリカの３カ国についての調査を行った。上記３カ国以外にフィンランドにおいても銅製処分容器の検討は行なわれているが、スウェーデンと共同で研究を行っており内容もほぼ同様であるため、本調査ではフィンランドを調査の対象から外すこととした。

スウェーデン、カナダ、アメリカにおける調査で得られた知見を一覧にまとめたものを表 2.4－１に示す。

スウェーデン、カナダ、アメリカの３カ国の中では、銅製処分容器を第一候補としているのはスウェーデンのみであり、カナダ、アメリカにおいては予備的な候補という位置づけである。このような背景のため、他２カ国と比較するとスウェーデンに関する銅製処分容器の情報量が多く、研究開発も先行している。

本調査で得られた銅製処分容器に特徴的な事柄を以下に示す。

1. 耐食を目的にした外壁に検討されている銅材については、３カ国とも純銅（無酸素銅）を中心に検討されており、これら純銅の耐食性に対する評価はスウェーデンでは 10 万年、カナダでは３万年という結果が得られている。
2. 各国とも複数の加工方法について検討をしている。実規模での試作が行われた銅製処分容器は構造支持材と銅材がそれぞれ独立した加工であり、そのため、スウェーデン及びアメリカで検討されているような二重容器では、構造支持部と銅材との間に挿入のためのギャップが存在している。
3. 各部の溶接方法については、各国ともいくつかの候補を挙げているが、その中に共通して挙げられている溶接法は電子ビーム溶接である。これは電子ビーム溶接がアーク溶接と比べてエネルギー密度が高いため入熱量を少なくすることができ、結晶粒の粗大化を抑えることができる事に着目された結果であると考えられる。

表 2.4－1　海外における銅処分容器の検討一覧

国名		スウェーデン	カナダ	アメリカ
処分容器名称		canister	container	container
埋設地	想定埋設地	未定	未定	ネバダ州Yucca山
	地層	花崗岩	深成火成岩	凝灰岩
	深さ	500m[1] (400～700m[3])	500m～1000m	300～400m
	備考	特になし	カナダ盾状地	放射性各種が生活圏に到達するまで 100,000年以上
処分廃棄物	種類	軽水炉燃料	重水炉燃料	高レベル廃棄物
要求機能	最大外部圧力	10MPa[1] (15MPa[2])	9.8MPa	不明
	容器外部温度上限	90℃	100℃[6]又は150℃[7]	230℃
	容器表面線量	500mGy/h	不明	不明
	銅厚さ	30mm	不明	不明
	耐久年数	1,000年	300～500年	300～1000年
処分容器	構造	二重容器	銅製外殻・粒充填型容器	二重容器/バイメタル製容器
	参考文献	文献2(1996)	文献6(1992)	文献8(1993)
	評価耐久年数	100,000年	30,000年	不明
	寸法	φ1050×4833H [mm] (BWR)	φ633×2246H [mm]	φ32.5×190H [in.] (二重容器)
	銅厚さ	50mm	25mm	50mm以上 (二重容器)
	材料	内部:鋳鋼又はダクタイル鋳鉄 外部:無酸素銅(UNS C10100)	外部:無酸素銅(UNS C10100)	二重容器 内部:アルミニウムブロンズ(UNS C61300) 外部:純銅 バイメタル製容器 外部:ニッケル-アルミニウムブロンズ 内部:純銅
	収容量(/容器)	BWR燃料の場合 12体 PWR燃料の場合 4体	CANDU炉使用済み燃料 72bundle	不明
製作方法	内部	鋳造	鋳造又は鍛造	鋳造
	銅円筒部分	圧延+電子ビーム溶接 管押し出し 熱間静水圧プレス 電着 溶射	不明	二重容器 圧延+溶接 バイメタル製容器 遠心鋳造
	底・蓋部接合	電子ビーム溶接	電子ビーム溶接 拡散接合	電子ビーム溶接 ガスタングステンアーク溶接(GTA) 摩擦溶接
備考		銅が第一候補	第一候補はチタン	

3．銅材料に関する調査

本章では銅および銅合金の一般的な性質や種類、それぞれの特性及び成形・加工性や接合等の製作に関わる現有又は開発中の技術について調査・整理する。さらに複合オーバーパック材としての観点から、機能上及び製作上考慮すべき性質や技術的な課題等について検討する。

3.1　銅及び銅合金の種類[1]

JIS(日本工業規格)に規定されている伸銅品(圧延・押出し・引抜き・鍛造等の熱間又は冷間の塑性加工によって造られた銅及び銅合金の板・条・管・棒・線の製品の総称)の種類は 68 合金種である。その種類記号は、ASTM(American Society for Testing and Materials)規格と同じく CDA(Copper Development Association)の合金番号を参考として、第 1 位に伸銅品を示す C の記号、その次に 4 桁の数字で表す合金番号、そして形状記号が付される。4 桁の番号は第 2 位が合金系統を示し、第 2～4 位は CDA の合金番号で、第 5 位は CDA と等しい場合は 0、それ以外は 1～9 を用いて示す。

合金の系統は主要添加元素によって表 3.1－1 のように 7 分類される。

JIS 規格に規定されていないが、実際に生産されている高銅合金を含めて、伸銅品の合金別分類と名称を表 3.1－2 に示す。表 3.1－3 に現行の JIS 製品規格に規定されている伸銅品の化学成分を示す。

表 3.1－1　合金番号の表し方[1]

第 1 位	第 2 位	第 3 位	第 4 位	第 5 位
C	×	×	×	×

C1×××	Cu・高 Cu 系合金
C2×××	Cu-Zn 系合金
C3×××	Cu-Zn-Pb 系合金
C4×××	Cu-Zn-Sn 系合金
C5×××	Cu-Sn 系合金・Cu-Sn-Pb 系合金
C6×××	Cu-Al 系合金・Cu-Si 系合金・特殊 Cu-Zn 系合金
C7×××	Cu-Ni 系合金・Cu-Ni-Zn 系合金

表 3.1－2　伸銅品の合金別分類と名称[1]

分類		合金系統	合金名称
純銅		Cu	無酸素銅(OFC)、タフピッチ銅、脱酸銅
高銅合金	非析出硬化型	Cu-As 系合金	ひ素銅
		Cu-Ag 系合金	銀入銅
		Cu-Te 系合金	テルル銅
		Cu-Cd 系合金	カドミウム銅
		Cu-Si 系合金	けい素(シリコン)銅
		Cu-Mn 系合金	マンガン銅
	析出硬化型	Cu-Be-Co 系合金	ベリリウム銅
		Cu-Ti 系合金	チタン銅
		Cu-Ni-Si 系合金	コルソン銅
		Cu-Cr 系合金	クロム銅
		Cu-Zr 系合金	ジルコニウム銅
		Cu-Fe 系合金	鉄入銅
黄銅		Cu-Zn 系合金	雷管用銅、丹銅、7/3 黄銅、6/4 黄銅、65/35 黄銅
		Cu-Zn-Pb 系合金	快削黄銅
		Cu-Zn-Sn 系合金	ネーバル黄銅、アドミラルティ黄銅
		Cu-Zn-Al 系合金	アルミニウム黄銅
		Cu-Zn-Mn-Al-Fe 系合金	高力黄銅
青銅		Cu-Sn 系合金	すず青銅
		Cu-Sn-P 系合金	りん青銅、快削りん青銅
特殊青銅		Cu-Al-Fe-Mn-Ni 系合金	アルミニウム青銅
		Cu-Si 系合金	シリコン青銅
銅・ﾆｯｹﾙ合金		Cu-Ni 系合金	白銅、キュプロニッケル
		Cu-Ni-Zn 系合金	洋白、快削洋白

表 3.1－3(1)　伸銅品(JIS 製品)種類名称及び化学成分表[1]

種類	旧称	旧記号	形状 板	条	棒	線	管	化学成分(%) Cu	Pb	Fe	Sn	Zn	Al	As	Be	Mn	Ni	Si	P	その他の規定
C1011	電子管用無酸素銅	EOFCu××	○	○	○	○	○	99.99以上	≦0.001	－	－	≦0.0001	－	－	－	－	Bi≦0.001 Cd≦0.0001	Hg≦0.0001 O∅≦0.001	≦0.0003	S≦0.0018　Te≦0.001 Se≦0.001
C1020	無酸素銅	OFCu××	○	○	○		○	99.96以上	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
C1100	タフピッチ銅　1種 印刷用銅　11種	TCu×1 CuPP11	○	○	○	○	○	99.90以上	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
C1201	りん脱酸銅 1A種	DCu×1A	○	○	○	○	○	99.90以上	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	0.004以上 0.015未満	－
C1220	りん脱酸銅　1B種	DCu×1B	○	○	○	○	○	99.90以上	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	0.015～ 0.040	－
C1221	りん脱酸銅　2種	DCu×2	○	○				(99.8) 99.75以上	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	0.004～ 0.040	－
C1401	印刷用銅　12種	CuPP12	○					99.30以上	－	－	－	－	－	－	－	－	0.10～0.20	－	－	－
C1700	ベリリウム銅　1種	BeCu×1	○	○				－	－	－	－	－	－	－	1.60～1.79	－	Ni+Co ≧0.20	－	－	Fe+Ni+Co≦0.6 Cu+Be+Fe+Ni+Co 99.5以上
C1720	ベリリウム銅　2種	BeCu×2	○	○	○	○		－	－	－	－	－	－	－	1.80～2.00	－	Ni+Co ≧0.20	－	－	Fe+Ni+Co≦0.6 Cu+Be+Fe+Ni+Co 99.5以上
C2051	電管用銅	CuRD		○				98.0～99.0	≦0.05	≦0.05	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C2100	丹銅　1種	RBs×1	○	○		○		94.0～96.0	≦0.05	≦0.05	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C2200	丹銅　2種	RBs×2	○	○		○	○	89.0～91.0	≦0.05	≦0.05	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C2300	丹銅　3種	RBs×3	○	○		○	○	84.0～86.0	≦0.05	≦0.05	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C2400	丹銅　4種	RBs×4	○	○		○		78.5～81.5	≦0.05	≦0.05	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C2600	製紙ロール黄銅　1種 黄銅　1種	Bs×1	○	○	○	○	○ 溶接	68.5～71.5	≦0.05	≦0.05	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C2680	黄銅　2A種	Bs×2A	○	○			溶接	64.0～68.0	≦0.05	≦0.05	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C2700	製紙ロール黄銅　2種 黄銅　2種	Bs×2			○	○	○	63.0～67.0	≦0.05	≦0.05	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C2720	黄銅　2B種	Bs×2B	○	○		○		62.0～64.0	≦0.07	≦0.07	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C2800	製紙ロール黄銅　3種 黄銅　3種	Bs×3			○	○	○	59.0～63.0	≦0.10	≦0.07	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C2801	黄銅　3種	Bs×3	○	○				59.0～62.0	≦0.10	≦0.07	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C3501	ニップル用黄銅	PbBs×				○		60.0～64.0	0.7～1.7	≦0.20	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	Fe+Sn≦0.40
C3560	快削黄銅　11種	PbBs×11	○	○				61.0～64.0	2.0～3.0	≦0.10	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C3561	快削黄銅　14種	PbBs×14	○	○				57.0～61.0	2.0～3.0	≦0.10	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	－

表 3.1－3(2)　伸銅品(JIS 製品)種類名称及び化学成分表[1]

種類	旧称	旧記号	形状					化学成分 (%)												
			板	条	棒	線	管	Cu	Pb	Fe	Sn	Zn	Al	As	Be	Mn	Ni	Si	P	その他の規定
C3601	快削黄銅 特1種	BsBM×1S			○	○		59.0～63.0	1.8～3.7	≦0.30	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	Fe+Sn≦0.50
C3602	快削黄銅 1種	BsBM×1			○	○		59.0～63.0	1.8～3.7	≦0.50	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	Fe+Sn≦1.2
C3603	快削黄銅 特2種	BsBM×2S			○	○		57.0～61.0	1.8～3.7	≦0.35	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	Fe+Sn≦0.6
C3604	快削黄銅 2種	BsBM×2			○	○		57.0～61.0	1.8～3.7	≦0.50	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	Fe+Sn≦1.2
C3605	－	－			○			56.0～60.0	3.5～4.5	≦0.50	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	Fe+Sn≦1.2
C3710	快削黄銅 12種	PbBs×12	○	○				58.0～62.0	0.6～1.2	≦0.10	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C3712	鍛造用黄銅 1種	PbBs×1			○			58.0～62.0	0.25～1.2	≦0.8		残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C3713	快削黄銅 13種	PbBs×13	○	○				58.0～62.0	1.0～2.0	≦0.10	－	残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C3771	鍛造用黄銅 2種	PbBs×2			○			57.0～61.0	1.0～2.5	≦1.0		残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C4250	－	－	○	○				87.0～90.0	≦0.05	≦0.05	1.5～3.0	残部	－	－	－	－	－	－	≦0.35	－
C4430	復水器用黄銅 1種	BsTP1	○	○			○	70.0～73.0	≦0.05	≦0.05	0.9～1.2	残部	－	0.02～0.06	－	－	－	－	－	－
C4621	ネーバル黄銅 1種	NBsP1	○					61.0～64.0	≦0.20	≦0.10	0.7～1.5	残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C4622	ネーバル黄銅 1種	NBsB×1			○			61.0～64.0	≦0.30	≦0.20	0.7～1.5	残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C4640	ネーバル黄銅 2種	NBsP2	○					59.0～62.0	≦0.20	≦0.10	0.50～1.0	残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C4641	ネーバル黄銅 2種	NBsB×2			○			59.0～62.0	≦0.50	≦0.20	0.50～1.0	残部	－	－	－	－	－	－	－	－
C5102	－	－	○	○	○	○		－	－	－	4.5～5.5	－	－	－	－	－	－	－	0.03～0.35	Cu+Sn+P 99.5以上
C5111	－	－	○	○	○	○		－	－	－	3.5～4.5	－	－	－	－	－	－	－	0.03～0.35	Cu+Sn+P 99.5以上
C5191	りん青銅 2種	PB×2	○	○	○	○		－	－	－	5.5～7.0	－	－	－	－	－	－	－	0.03～0.35	Cu+Sn+P 99.5以上
C5210	ばね用りん青銅	PBS×	○	○				－	≦0.05	≦0.10	7.0～9.0	≦0.20	－	－	－	－	－	－	0.03～0.35	Cu+Sn+P 99.7以上
C5212	りん青銅 3種	PB×3	○	○	○	○		－	－	－	7.0～9.0	－	－	－	－	－	－	－	0.03～0.35	Cu+Sn+P 99.5以上
C5341	快削りん青銅 1種	PbPBB1			○				0.8～1.5		3.5～5.8	－	－	－	－	－	－	－	0.03～0.35	Cu+Sn+Pb+P 99.5以上
C5441	快削りん青銅 2種	PbPBB2			○			－	3.5～4.5	－	3.0～4.5	1.5～4.5	－	－	－	－	－	－	0.01～0.50	Cu+Sn+Pb+Zn+P 99.5以上
C6140	－	－	○					88.0～92.5	≦0.01	1.5～3.5	－	≦0.20	6.8～8.0	－	－	≦1.0	－	－	≦0.015	Cu+Pb+Fe+Zn+Mn+Al+P 99.5以上
C6161	アルミ青銅 1種	AB×1	○		○			83.0～90.0	－	2.0～4.0	－	－	7.0～10.0	－	－	0.50～2.0	0.50～2.0	－	－	Cu+Al+Fe+Ni+Mn 99.5以上

表 3.1－3(3)　伸銅品(JIS 製品)種類名称及び化学成分表(1)

種類	旧称	旧記号	形状 板	条	棒	線	管	化学成分(%) Cu	Pb	Fe	Sn	Zn	Al	As	Be	Mn	Ni	Si	P	その他の規定
C6191	アルミ青銅 2種	AB×2			○			81.0～88.0	－	3.0～5.0	－	－	8.5～11.0	－	－	0.50～2.0	0.50～2.0	－	－	Cu＋Al＋Fe＋Ni＋Mn 99.5以上
C6241	アルミ青銅 3種	AB×3			○			80.0～87.0	－	3.0～5.0	－	－	9.0～12.0	－	－	0.50～2.0	0.50～2.0	－	－	Cu＋Al＋Fe＋Ni＋Mn 99.5以上
C6280	アルミ青銅 4種	AB×4	○					78.0～85.0	－	1.5～3.5	－	－	8.0～11.0	－	－	0.50～2.0	4.0～7.0	－	－	Cu＋Al＋Fe＋Ni＋Mn 99.5以上
C6301	アルミ青銅 5種	AB×5	○					77.0～84.0	－	3.5～6.0	－	－	8.5～10.5	－	－	0.50～2.0	4.0～6.0	－	－	Cu＋Al＋Fe＋Ni＋Mn 99.5以上
C6711	楽器弁用黄銅 11種	BsPV11	○					61.0～65.0	0.10～1.0	－	0.7～1.5	残部	－	－	－	0.05～1.0	－	－	－	Fe＋Al＋Si≦1.0
C6712	楽器弁用黄銅 12種	BsPV12	○					58.0～62.0	0.10～1.0	－	－	残部	－	－	－	0.05～1.0	－	－	－	Fe＋Al＋Si≦1.0
C6782	高力黄銅 1種 2種	HBsB×1 HBsB×2			○			56.0～60.5	≦0.50	0.10～1.0	－	残部	0.20～2.0	－	－	0.50～2.5	－	－	－	－
C6783	高力黄銅 3種	HBsB×3			○			55.0～59.0	≦0.50	0.20～1.5	－	残部	0.20～2.0	－	－	1.0～3.0	－	－	－	－
C6870	復水器用黄銅 4種	BsTF4S					○	76.0～79.0	≦0.05	≦0.05	－	残部	1.8～2.5	0.02～0.06	－	－	－	－	－	－
C6871	復水器用黄銅 2種	BsTF2					○	76.0～79.0	≦0.05	≦0.05	－	残部	1.8～2.5	0.02～0.06	－	－	－	0.02～0.50	－	－
C6872	復水器用黄銅 3種	BsTF3					○	76.0～79.0	≦0.05	≦0.05	－	残部	1.8～2.5	0.02～0.06	－	－	0.20～1.0	－	－	－
C7060	復水器用白銅 1種	CNTF1	○				○	－	≦0.05	1.0～1.8	－	≦0.50	－	－	－	0.20～1.0	9.0～11.0	－	－	Cu＋Ni＋Fe＋Mn 99.5以上
C7100	復水器用白銅 2種	CNTF2					○	－	≦0.05	0.50～1.0	－	≦0.50	－	－	－	0.20～1.0	19.0～23.0	－	－	Cu＋Ni＋Fe＋Mn 99.5以上
C7150	復水器用白銅 3種	CNTF3	○				○	－	≦0.05	0.40～1.0	－	≦0.50	－	－	－	0.20～1.0	29.0～33.0	－	－	Cu＋Ni＋Fe＋Mn 99.5以上
C7164	－	－.					○	－	≦0.05	1.7～2.3	－	≦0.50	－	－	－	1.5～2.5	29.0～32.0	－	－	Cu＋Ni＋Fe＋Mn 99.5以上
C7351	洋白 1種	NS×1	○	○				70.0～75.0	(1) ≦0.10	≦0.25	－	残部	－	－	－	0～0.50	(2) 16.5～19.5	－	－	－
C7451	洋白 4種	NS×4	○	○		○		63.0～67.0	(1) ≦0.10	≦0.25	－	残部	－	－	－	0～0.50	(2) 8.5～11.0	－	－	－
C7521	洋白 2種	NS×2	○	○	○	○		62.0～66.0	(1) ≦0.10	≦0.25	－	残部	－	－	－	0～0.50	(2) 16.5～19.5	－	－	－
C7541	洋白 3種	NS×3	○	○	○	○		60.0～64.0	(1) ≦0.10	≦0.25	－	残部	－	－	－	0～0.50	(2) 12.5～15.5	－	－	－
C7701	ばね用洋白・洋白特種	NSS×	○	○	○	○		54.0～58.0	(1) ≦0.10	≦0.25	－	残部	－	－	－	0～0.50	(2) 16.5～19.5	－	－	－
C7941	快削洋白	PbNSB			○			60.0～64.0	0.8～1.8	≦0.25	－	残部	－	－	－	0～0.50	(2) 16.5～19.5	－	－	－

注 (1) 注文者の要求があるものに限り行う。
(2) Ni中のCoはNiに含む。
×の記号　板：P，条：R，引抜棒：BD，押出棒：BE，線：W，管：T

3.2 銅の特徴

3.2.1 物理的・機械的性質[1]

銅は、周期表第Ⅰ族 B に属する一価金属であり、銀に次いで導電性に優れる金属として知られている。結晶構造は面心立方格子で、磁性的には反磁性体である。

純銅の物理的・機械的性質を表 3.2－1 に示す。表中の数値に範囲があるのは、塑性加工及び熱処理による変化である。表 3.2－2 に純銅の体積抵抗率と熱伝導率・比熱の温度依存性を示す。表 3.2－3 に各種銅合金(JIS 合金)の物理的性質を示す。

銅の最大の長所は高い電気伝導度と熱伝導性を有することである。また、はんだ付け性等の接合性や耐食性にも優れ、高い信頼性が保証できる。これらの特性を利用した用途を表 3.2－4 に示す。

表 3.2－1　純銅の物理的・機械的性質[1]

項目	数値
原子番号	29
原子量	63.546
比重	8.89～8.96 g/cm^3
融点	1083 ℃
線膨張率	16.8～17.2 ×10^{-6}/K
電気伝導度	35～58 m/Ω・mm^2
熱伝導度	240～386 W/m・K
縦弾性係数	100～130 kN/mm^2
引張強さ	200～360 N/mm^2
0.2%耐力	100～250 N/mm^2
破断伸び	2～45 %
ブリネル硬さ	55～110 kg/mm^2
比熱	0.38～0.45 J/g・K
体積抵抗率	17～30 ×10^{-3}μΩ・m

＊数値の範囲は塑性加工及び熱処理による。

表 3.2－2　純銅の体積抵抗率と熱伝導率・比熱の温度依存性[1]

温度 ℃	体積抵抗率 ×10^{-3}μΩ・m	熱伝導率 W/m・K	比熱 J/g・K
20	16.94	394	0.385
100	－	394	0.389
200	29.3	389	0.402
500	46 (497℃)	341 (583℃)	0.427
1,000	81 (977℃)	244 (1,037℃)	0.473

表 3.2－3(1)　各種銅合金の物理的性質(JIS 合金)[1]

合金番号		融点[℃]		比熱 [J/(kg・K)] (20℃)	比重 (20℃)	熱伝導率 [W/(m・K)] (20℃)	線膨張係数 (20～300℃) [×10⁻⁶/K]	縦弾性係数 [kN/mm²]	横弾性係数 [kN/mm²]	ポアソン比	導電率 [%IACS]	体積抵抗率 [10⁻³ μΩ・m]
JIS	関連ASTM	液相	固相									
C1011	C10100	1083	1083	385	8.94	391	17.7	118	44	0.33	101	17.1
C1020	C10200	1083	1083	385	8.94	391	17.7	118	44	0.33	101	17.1
C1100	C11000	1083	1065	385	8.89～8.94	391	17.7	118	44	0.33	101	17.1
C1201	C12000	1083	1083	385	8.94	381	17.7	118	44	0.33	98	17.6
C1220 C1221	C12200	1083	－	385	8.94	339	17.7	118	44	0.33	85	20.3
C1700	C17000	980	865	418	8.41	109～130	17.8	127	49	0.30	22	76.8
C1720	C17200	980	865	418	8.26	109～130	17.8	127	49	0.30	22	76.8
C2100	C21000	1065	1050	377	8.86	234	18.1	118	44	0.33	56	30.8
C2200	C22000	1045	1020	377	8.80	188	18.4	118	44	0.33	44	39.2
C2300	C23000	1025	990	377	8.75	159	18.7	118	44	0.33	37	46.6
C2400	C24000	1000	965	377	8.67	138	19.1	110	41	0.33	32	53.9
C2600	C26000	955	915	377	8.53	121	19.9	110	41	0.33	28	61.6
C2680 C2700 C2720	C26800 C27000 C27200	930	905	377	8.47	117	20.3	103	38	0.35	27	63.9
C2800 C2801	C28000	905	900	377	8.39	121	20.8	103	38	0.35	28	61.6
C3501	C35000	915	895	377	8.44	117	20.3	103	38	0.35	26	66.3
C3560 C3561	C35600	905	885	377	8.50	117	20.5	96	36	0.32	26	66.3
C3601 C3602 C3603 C3604	C36000	900	885	377	8.50	117	20.5	96	36	0.32	26	66.3
C3710 C3713 C3712	C37100	900	885	377	8.41	117	20.8	103	38	0.35	27	63.9
C3771	C37700	895	880	377	8.44	117	20.7	103	38	0.35	27	63.9

表 3.2－3(2)　各種銅合金の物理的性質(JIS 合金)[1]

合金番号		融点[℃]		比熱 [J/(kg・K)] (20℃)	比重 (20℃)	熱伝導率 [W/(m・K)] (20℃)	線膨張係数 (20～300℃) [×10⁻⁶/K]	縦弾性係数 [kN/mm²]	横弾性係数 [kN/mm²]	ポアソン比	導電率 [%IACS]	体積抵抗率 [10⁻³ μΩ・m]
JIS	関連ASTM	液相	固相									
C4250	C42500	1030	1010	377	8.78	121	18.4	110	－	－	28	62
C4430	C44300	935	900	377	8.53	109	20.2	110	41	0.33	25	69.0
C4640 C4641	C46400	900	885	377	8.41	117	21.2	103	38	0.35	26	66.3
C5102	C51000	1050	950	377	8.86	71	17.8	110	41	0.33	15	115
C5111	C51100	1060	975	377	8.86	84	17.8	110	41	0.33	20	87
C5191	C51900	1045	910	377	8.83	67	18.0	105	－	－	13	133
C5210 C5212	C52100	1020	880	377	8.80	63	18.2	110	41	0.33	12	144
C5441	C54400	1000	930	377	8.89	88	17.3	103	38	0.35	19	90.7
C6140	C61400	1045	1040	377	7.89	67	16.2	118	44	0.33	14	123
C6191	C61900	1050	1040	418	7.5	80	16.2	110	－	－	10.5	164
C6241	C62400	1040	1025	377	7.45	59	19.2	118	44	0.33	12	144
C6301	C63000	1054	1035	377	7.58	38	16.2	120	44	0.36	7	192
C6870 C6871 C6872	C68700	970	935	377	8.33	100	18.5	110	41	0.33	23	75.0
C7060	C70600	1150	1100	377	8.94	46	17.1	125	47	0.32	9.0	191
C7100	C71000	1200	1150	377	8.94	38	16.4	138	52	0.34	6.5	266
C7150	C71500	1240	1170	377	8.94	29	16.2	152	57	0.34	4.6	375
C7451	C74500	1020	－	377	8.69	46	16.4	121	45	0.34	9.0	192
C7521	C75200	1110	1070	377	8.73	33	16.2	125	47	0.32	6.0	287
C7541	C75400	1075	1040	377	8.70	38	16.2	125	47	0.32	7.0	246
C7701	C77000	1055	－	377	8.70	29	16.7	125	47	0.32	5.5	314

表 3.2－4　銅の特性を利用した用途[1]

銅の特性	用途	合金
電気伝導度が大きい	電気用材料 耐熱・高電気伝導性材料 高温度・高電気伝導性材料	低濃度耐熱合金 アルミナ分散強化銅 時効硬化性合金
熱伝導性が良い （接合性が良い）	ラジエーター用 太陽熱利用（ヒートパイプ） 住宅用、建築用	低濃度耐熱性合金 純銅薄肉ストリップ及び管
強度を高くできる	ばね、端子、機械部品 半導体リードフレーム	高強度合金
耐食性が優れている （美麗な色調）	熱交換器用管用 化学プロセス装置用 海洋開発用、建築用	耐食性合金
熱弾性マルテンサイト	形状記憶（温度調節、温度変化の機械力への変換など） 騒音防止	形状記憶合金 制振合金

3.2.2　化学的性質[2]

大気中で酸素を含む水と接する場合、銅及び銅合金表面には酸化銅(Cu_2O・CuO)、水酸化銅($Cu(OH)_2$)、あるいは塩基性炭酸銅($Cu_2(OH)_2CO_3$)が形成する。そして、これらの腐食生成物皮膜が非溶解性で安定して存在することにより、銅及び銅合金の耐食性が良好に保たれる。

従って、このような皮膜が破壊、あるいは脱落(剥離)するような使用条件下である場合、さらには皮膜が安定して生成し得ない使用環境下において化学的溶解すなわち腐食が生じることとなる。

銅及び銅合金の耐食性の特徴を列挙すれば次のようである。

① 電気化学列において水素よりも貴な電位を示すので、水素発生反応を基本とする腐食反応は起こらない。

② 溶存酸素を含まない水や非酸化性の酸に対して熱力学的に安定で腐食傾向を持たない。

③ 明瞭な不動態皮膜の存在は知られておらず、隙間腐食は一般に生じない。

④ 海水などの中性の塩類に対し充分耐食的である。激しい流動条件下では皮膜が剥離し衝撃腐食あるいは潰食と呼ばれる腐食を生じる。この場合、腐食速度は溶存酸素

量と共に増大する。

⑤ 大気や天然水に対し耐食性を持つ。

⑥ 耐食性を示さない環境として次のものが知られている。

(a) CN^-やNH_4^+等、銅と錯塩を作る曝気溶液

(b) 硫化水素や硫化物

(c) 濃厚なアルカリ溶液(KOH・NaOH)

(d) 酸化性重金属塩、例えば$FeCl_3$・$Fe_2(SO_4)_3$・$Cu(NO_3)_2$

(e) 酸化性の酸(例えば硝酸・濃硫酸)、曝気した非酸化性の酸(例えば塩酸・希硫酸)

(f) 湿潤なガス、例えばCl_2・Br_2・CO_2

⑦ 合金の種類によっては脱成分腐食を生じる。(例えば黄銅の脱亜鉛腐食)

⑧ 銅合金の中にはアンモニア雰囲気中で一定以上の引張り応力が加わった場合、応力腐食割れを起こすことがある。

銅を含め全ての実用金属は酸素を含む水環境、酸やアルカリ水溶液ではイオンとなって溶解する。しかし、水溶液中での(含水)酸化物は安定であって、金属表面において保護的皮膜となる。この皮膜は「不動態皮膜」と呼ばれ厚さ数 10Åの薄膜(Passivity)とμm オーダーの沈澱生成物(Passivation)の 2 種類に区別でき、銅表面は専ら Passivation 皮膜に覆われるとされている。Passivation 皮膜は厚く、金属との密着性に劣るポーラスで脆い皮膜である。銅及び銅合金に隙間腐食が生じないこと、高流速の温水中や海水中で衝撃腐食が生じること、海水浸漬材の腐食電位が金属表面のそれとさほど変らず、かつ経時的な変化が少ないことは、いずれも Passivation 皮膜の特性によるものとみなされる。

3.2.3 水素脆化[3]

銅中への O の溶解度は、共晶温度でも 0.008%と低く、銅中に過剰に含まれた O はCu_2Oの形で存在する。水素は原子半径と質量が小さいため金属結晶中の拡散速度が非常に大きい。表 3.2－5 に銅の自己拡散及び銅中の H と O の拡散の活性化エネルギーとエントロピーの項を示す。

表 3.2－5　銅中の拡散の活性化エネルギーとエントロピー項[3]

[$D=D_0\exp(-Q/RT)$]

拡散元素	D_0[cm²/s]	Q[kcaℓ/moℓ]	$D_{850℃}$[cm²/s]
H	11.31×10^{-3}	9.286	1.76×10^{-4}
O	1.76×10^{-2}	16.0	1.36×10^{-5}
Cu	0.78～0.20	50.4～46.9	$1.22\sim1.50\times10^{-10}$

O を多量に含む銅結晶中では気相から侵入してきた原子状の H は次の反応を起こす。

$$Cu_2O+2(H)_{Cu} \rightarrow 2Cu+H_2O \qquad (3.2-1)$$

H_2O は分子として銅結晶中に固溶することができず粒界等で気泡になる。このためかなりの O を含むタフピッチ銅(0.015～0.04%O)は、還元性雰囲気中で加熱されると脆化する。りん脱酸銅や無酸素銅では通常水素脆化は起こらないが、溶接やろう接時に酸化性雰囲気での加熱後、還元性雰囲気で加熱されると粒界割れが発生することがある。塑性加工中の中間焼なまし雰囲気にも注意が必要である。

3.3　銅及び銅合金の加工性

3.3.1　概要[1]

面心立方構造の銅は展延性が良好で絞り加工や曲げ加工も容易である。深絞り用途には純銅・黄銅・りん青銅・洋白等の板条が日用品・家庭用品・建築用品等に幅広く使われている。曲げ加工については合金の選定よりむしろ質別の選択が重要で、一般的に強度と曲げ加工性は反比例の関係にあることから、厳しい曲げ加工を行う場合には強度レベルを適正に選ぶ必要がある。

切削加工についても銅及び銅合金は被切削性の良い金属に分類される。特に鉛を少量添加した快削黄銅は最も切削性が優れる金属材料の一つであり、精密切削が要求される機械部品等に幅広く使用されている。

各種銅及び銅合金の板・条の加工特性と主要な用途を表 3.3－1 に示す。

表 3.3－1(1)　各種銅及び銅合金の板・条の加工特性と主な用途[1]

合金系	名称	種類	主な成分 %	特性 導電率	耐食性	ばね性	耐摩耗性	冷間鍛造	熱間鍛造	曲げ	深絞り	かしめ	シャー	プレス	被削性	溶接性	めっき性	用途
Cu	無酸素銅	C1020	Cu	◎	◎	－	－	◎	◎	○	○	◎	○	○	○	◎	◎	水素ぜい化を起こさない。電気用，化学工業用
	タフピッチ銅	C1100	Cu	◎	◎	－	○	◎	○	○	○	○	○	○	－	－	◎	電気用，建築用，化学工業用，ガスケット，器物，自動車用部品，機械部品
	りん脱酸銅	C1201 C1220 C1221	Cu	◎	◎	－	－	◎	◎	○	○	◎	○	○	－	◎	◎	風呂がま，湯沸器，ガスケット，電気冷蔵庫，建築用，化学工業用，水素ぜい化を起こさない。
	印刷用銅	C1100 C1221 C1401	Cu Cu Cu－Ni(0.2)	◎	－	－	○	◎	○	○	○	○	○	○	－	－	◎	特に表面が平滑である。グラビア版用，写真凸版用 特に表面が平滑で，耐熱性がある。写真凸版用
	電子管用無酸素銅	C1011	Cu	◎	◎	－	－	◎	◎	○	○	◎	○	○	－	◎	◎	水素ぜい化を起こさない。銅のうち最も高純度である。電子管
Cu－Zn系	雷管用銅	C2051	Cu－Zn(2)	◎	◎	－	－	◎	○	◎	◎	◎	○	○	－	◎	◎	雷管用
	丹銅	C2100 C2200 C2300 C2400	Cu－Zn(5) Cu－Zn(10) Cu－Zn(15) Cu－Zn(20)	○	◎	－	－	◎	○	◎	◎	○	○	○	－	◎	◎	色沢が美しく，建築用，装身具用，化粧品ケース，家具絞り加工用，ファスナー，薬きょう，製紙用金網
Cu－Zn系	黄銅	C2600	Cu－Zn(30)	○	◎	○	－	◎	○	◎	◎	○	○	○	－	◎	◎	自動車用ラジエータ，薬きょう，ばね
		C2680	Cu－Zn(35)															自動車用ラジエータ，スナップボタン，カメラ，まほうびん，配線金具，スイッチ端子
		C2720	Cu－Zn(37)	○	◎	－	－	◎	○	◎	◎	○	○	○	－	◎	◎	金属雑貨，浅い絞りもの
		C2801	Cu－Zn(40)	○	○	－	－	○	◎	○	○	○	○	○	－	◎	◎	配線器具部品，ネームプレート，計器板，スイッチ端子，一般板金用
	快削黄銅	C3560 C3561	Cu－Zn(37)－Pb(2.5)	○	○	－	－	○	－	－	－	－	◎	◎	◎	◎	○	特に被削性，打抜性に優れている。時計部品，歯車，製紙用スクリーン
		C3710 C3713	Cu－Zn(40)－Pb(1)	○	○	－	－	○	○	－	－	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
	ネーバル黄銅	C4621	Cu－Zn(37)－Sn(1)	○	◎	－	－	○	○	○	－	○	○	○	－	◎	◎	特に耐海水性に優れている。熱交換器及び復水器用管板，船舶部品，空気冷却器管板，船舶海水取入口用
		C4640	Cu－Zn(40)－Sn(0.8)	○	◎	－	－	○	◎	○	－	○	○	○	－	◎	◎	
	楽器弁用黄銅	C6711 C6712	Cu－Zn(37)－Pb(0.5)－Sn(1)－Mn(0.5) Cu－Zn(40)－Pb(0.5)－Mn(0.5)	－	◎	○	－	－	○	－	－	－	○	－	○	○	○	ハーモニカ，オルガン，アコーディオンなどの楽器弁

表 3.3－1(2)　各種銅及び銅合金の板・条の加工特性と主な用途[1]

合金系	名称	種類	主な成分 %	特性														用途
				導電率	耐食性	ばね性	耐摩耗性	冷間鍛造	熱間鍛造	曲げ	深絞り	かしめ	シャー	プレス	被削性	溶接性	めっき性	
Cu－Al系	特殊アルミニウム青銅	C6161 C6280 C6301	Cu－Al(8)－Fe(3)－Ni(1)－Mn(1) Cu－Al(10)－Fe(2)－Ni(5)－Mn(1) Cu－Al(10)－Fe(5)－Ni(5)－Mn(1)	○	◎	－	◎	－	◎	－	－	－	○	－	－	－	－	特に耐摩耗性、耐海水性に優れている。機械部品，化学工業用，船舶用
Cu－Ni系	白銅	C7060 C7150	Cu－Ni(10)－Fe(1.5)－Mn(0.5) Cu－Ni(30)－Fe(0.5)－Mn(0.5)	○	◎	◎	◎	－	－	－	－	－	○	○	－	◎	◎	特に耐海水性，耐摩耗性が優れ，高温強度も良い。熱交換器用管板
Cu－Sn－P系	りん青銅	C5111 C5191 C5212	Cu－Sn(4)－P(0.1) Cu－Sn(6)－P(0.1) Cu－Sn(8)－P(0.1)	○	◎	◎	◎	◎	－	◎	○	◎	○	○	－	◎	◎	電子・電気機器用ばね，スイッチ，ＩＣリードフレーム，コネクタ，ダイヤフラム，ベロー，ヒューズクリップ，しゅう動片，軸受，ブッシュ
	ばね用りん青銅	C5210	Cu－Sn(8)－P(0.2)	○	◎	◎	◎	◎	－	◎	○	◎	○	○	－	◎	◎	特にばね性に優れている。電子・電気計測用のスイッチ，コネクタ，リレー
Cu－Ni－Zn系	洋白	C7351 C7451 C7521 C7541	Cu－Ni(18)－Zn(10) Cu－Ni(10)－Zn(25) Cu－Ni(18)－Zn(18) Cu－Ni(14)－Zn(25)	○	◎	◎	◎	◎	－	◎	◎	◎	○	○	－	◎	◎	光沢が美しく，耐食性，耐疲労性が良い。トランジスターキャップ，ボリウム用しゅう動片，装飾品，洋食器，医療機器，建築用
	ばね用洋白	C7701	Cu－Ni(18)－Zn(26)	○	◎	◎	◎	◎	－	◎	◎	◎	○	○	－	◎	◎	特にばね性に優れている。電子・電気計測機器用のスイッチ，コネクタ，リレー，ダイヤフラム
Cu－Be系	ばね用ベリリウム銅	C1700 C1720	Cu－Be(1.7)－Co(＋Ni，0.2以上) Cu－Be(1.9)－Co(＋Ni，0.2以上)	◎	◎	◎	◎	◎	－	◎	◎	◎	○	○	－	◎	◎	高性能ばね，継電器用ばね，電気機器用ばね，マイクロスイッチ，ダイヤフラム，ベロー，時計用歯車，ヒューズクリップ，コネクタ，ソケット

備考：◎優れている　○：良い　－：良くない

3.3.2 溶接性[4]

銅及び銅合金の接合方法を分類すると、溶接・圧接・ろう接・機械的接合・接着接合に大別される。

接合方法の選択には、接合される材料の物理的性質を十分把握しておくことが大切である。例えば、純銅は熱伝導度が鉄の 6 倍以上、アルミニウムの 2 倍以上と高く、熱が放散しやすいために溶融溶接、特にこの中でもアーク溶接を行う場合には大きな入熱及び予熱が必要となる。また、電気抵抗も低いため抵抗発熱が少なく抵抗スポット溶接や抵抗シーム溶接は困難を伴う。

一方、黄銅・青銅・キュプロニッケル等の合金はその性質が純銅と大きく異なり、またその合金間でも性質が異なり接合性に大きく影響するので、各種合金の接合を上手に行うためには、その材料の物性を十分把握しておくことが肝要である。

銅中への水素溶解度を図 3.3－1 に示す。液相の溶接金属中に溶解していた水素は凝固時に固相中に固溶限以上の水素がブローホールとして生成するようになる。すなわち固液間での溶解度差が大きいほどブローホールが発生しやすくなる。

ろう接は銅及び銅合金の接合法として最も古くから用いられ、現在でも幅広く利用されている接合方法である。

各種材料の接合に当たっては、その用途・目的及び接合される材料の種類に応じて、接合部に要求される特性を満足するために最も適した接合方法を選択する必要がある。

ここでは、オーバーパックの最終封止等の接合法として採用が予想される溶接について取り上げる。表 3.3－2 に代表的な銅及び銅合金の溶接性を示す。

一般に 10mm^{t}以上の厚板の溶接に用いられる溶接方法には、MIG(Metal Inert Gas Arc)溶接・電子ビーム溶接・レーザ溶接等が用いられる。以下にそれぞれの溶接方法について簡単に触れる。

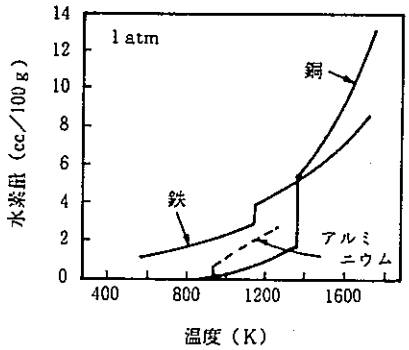


図 3.3－1　銅中への水素溶解度と温度との関係[4]

表 3.3－2　銅及び銅合金の溶接特性[4]

合金名 合金系	合金番号	相対的熱 伝導率	ＴＩＧ溶接	ＭＩＧ溶接	サブマージアーク 溶接	抵抗溶接
無酸素銅	C10200	100	良	良	不可	(a)
タフピッチ銅	C11000	100	可	可	不可	H－350
りん脱酸銅	C12000DLP	99	優	優	不可	(a)
	C12000DHP	87	優	優	不可	(a)
ベリリウム銅	C17000	27－33	良	良	良	C－150
	C17200	27－33	良	良	良	C－150
	C17500	53－66	可	可	可	(b)
丹銅	C21000	60	良	良	良	H－200
	C22000	48	良	良	不可	H－200
	C23000	41	良	良	不可	H－200
	C24000	36	良	良	不可	G－175
黄銅	C26000	31	可	可	不可	B－150
	C26800	30	可	可	不可	F－150
	C28000	31	可	可	不可	F－150
アドミラルティ黄銅	C44300	28	可	可	不可	(b)
	C46400	30	可	可	不可	(b)
りん青銅	C50500	53	良	良	可	G－200
	C51000	18	良	良	可	D－125
	C52100	16	良	良	可	D－125
	C52400	13	良	良	可	D－125
アルミニウム青銅	C61300	14	良	優	良	(b)
	C61400	17	良	優	良	(b)
	C63000	10	良	良	良	(b)
シリコン青銅	C65100	15	優	優	可	B－125
	C65500	9	優	優	可	B－125
マンガン黄銅	C67500	27	可	可	不可	C－125
アルミニウム黄銅	C68700	26	可	可	不可	(b)
白銅	C70600	12	優	優	良	(b)
	C71500	8	優	優	良	C－125
洋白	C74500	12	良	良	不可	C－125
	C75200	8	良	良	不可	C－125
	C75400	9	良	良	不可	C－125
	C75700	10	良	良	不可	(b)
	C77000	8	良	良	不可	(b)

(注) 相対的熱伝導率はC10200（無酸素銅）を100%とした。Aは比較のベースで，冷圧鋼板の溶接条件と同等を意味する。Bは抵抗溶接は容易であるが銅ほどではない。C，D，E，F，Gの順に溶接は難しくなる。Gは溶接は可能であるが，100%均一に溶接されるとは限らない。Hは通常はスポット溶接するのは非現実とされていることを意味する。表示の後の数値は，銅の溶接時の2次電流を100とした場合の2次電流値を示す。

(a)：RWWAには評価の記載がないCDAによると推奨されない。

(b)：RWWAには評価の記載がないCDAによると溶接性良好

(1) MIG 溶接

MIG 溶接法は不活性ガス雰囲気中でアークを発生させ溶接する方法である。図 3.3－2に MIG 溶接法の原理を示す。溶加材としての役目を併せ持つワイヤを電極とする。TIG(Tungsten Inert Gas Arc)溶接に比べて MIG 溶接は熱集中が良いので予熱温度・パス間温度を低くできる。また溶着速度も大きくとれ、板厚 6mm 以上の銅・銅合金の溶接のほか、肉盛溶接にも用いることが可能である。

(2) 電子ビーム溶接

図 3.3－3に電子ビーム溶接装置の模式図を示す。電子銃から出た電子ビームは 5×10^{-3}～1×10^{-1}torr 程度の真空室で試料に照射される。絞られた電子ビームは高いエネルギー密度となり、試料に穿孔を作りながら溶接するので、溶接ビード幅は狭く、深い溶け込みが容易に得られる。熱集中が極めて良いため、予熱することもなく銅の溶接ができる。

アーク溶接で水素脆化が懸念されるタフピッチ銅も真空雰囲気で溶接するので水素源の心配がないため溶接が可能である。ただし、適切な条件を選択しないと銅と結合していた酸素がブローホールとして発生するので注意が必要である。蒸発しやすい元素の亜鉛を含む黄銅は、ブローホールが多発しやすくなるので溶接は困難である。

(3) レーザ溶接

レーザはレーザ媒質を励起してその媒質から放出される光を光共振器で増幅し、取出したものである。図 3.3－4に CO_2 レーザ溶接装置の概略を示す。電子ビームと同様に、エネルギー密度の高い熱源なので他の熱源に比較して深い溶け込みが得られる。しかし、銅では反射率がアルミや炭素鋼よりも高く固体金属への吸収が少ないので高出力が必要となる。

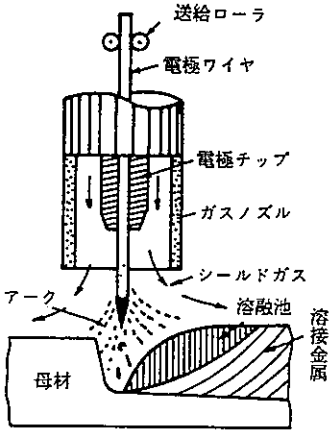


図 3.3－2　MIG 溶接法の原理[4]

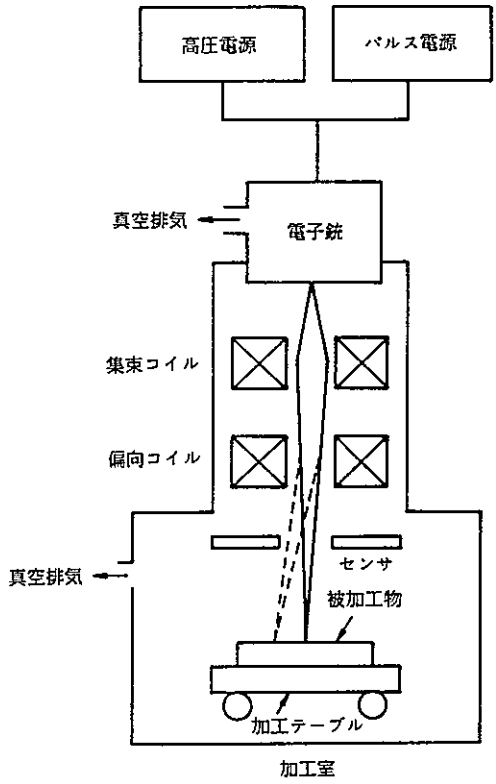


図 3.3－3　電子ビーム溶接装置の概略[4]

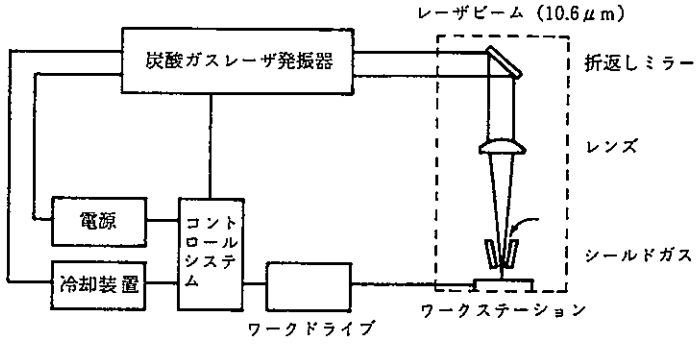


図 3.3－4　CO_2ガスレーザ溶接装置の概略[4]

3.4 オーバーパックに用いる銅材料

銅は金属単体で鉱石中に含まれている場合がある数少ない元素の 1 つである。また、古代遺跡からは青銅器が発掘されており、材料の長期安定性についてのデータが存在する材料でもある。

オーバーパックの耐食層に用いる銅の材質を選定する上では、材料が地下約 1,000m の 25MPa～35MPa の圧力下、150℃で 1,000 年間の健全性を保証しなければならない。しかし、現状では上記の条件を満たすことを証明できるデータが取られていない。また、オーバーパック製作時において銅材料に要求される項目には、以下のものがある。

- 溶接性が良いこと。→溶接による脆化（CuO の生成）を防ぐため、銅中の O 濃度が低いことが必要。
- 溶接時等の加熱によって水素脆化を示さないこと。→銅中の O 濃度、H 濃度が低いことが必要。
- 脆化の原因となる金属間化合物の粒界析出がないこと。→銅中の S 濃度が低いことが必要。
- 熱間加工中又は溶接時に結晶粒粗大化が起こらないこと。→２章のスウェーデンの事例でも述べたように、粒径が大きいと蓋溶接後の超音波探傷試験の精度が低下することが報告されている。再結晶温度が高くなるような成分調整が必要。

例えば黄銅の場合、一般的に無酸素銅よりも強度が高く、機械加工性が優れた合金種があるが、以下に示す点でオーバーパック材料として不適当である。

- 溶融時の脱亜鉛現象のため、溶接部分の組成が母材と異なる場合がある。
- 埋設条件により、亜鉛が選択的に腐食溶解する脱亜鉛腐食が起こる可能性がある。
- 150℃程度の低温でも焼きなまし硬化現象を示す等、金属組織学的な安定性に問題がある。(析出物が生成している可能性がある。)
- 応力腐食割れ感受性が高い。

図 3.4－１に Cu-Zn 合金の物理的性質とともに Zn の蒸発温度を示す。表 3.4－1 に脱亜鉛腐食感受性評価試験結果の一例を示す。図 3.4－２に 70-30 黄銅の 50%加工材を焼なましたときの機械的性質の変化を示す。図 3.4－３にアンモニア蒸気中における各種銅合金の応力腐食割れ感受性を示す。

純銅は銅合金と比較して腐食電位が貴であるため、他の金属と接触した場合に純銅自身が腐食する可能性は他の銅合金よりも低い。

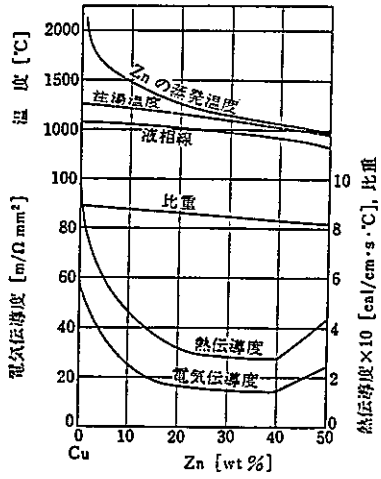


図 3.4－1　Cu-Zn 合金の物理的性質と Zn の蒸発温度[3]

表 3.4－1　脱亜鉛腐食感受性評価試験結果の一例[2]

合　　金	ISO－6509		JBMA T－303	
	最大腐食深さ（μm）	平均腐食深さ（μm）	最大腐食深さ（μm）	平均腐食深さ（μm）
C2700T	400	300	120	100
C3604B	1000	900	160	70
C3771B鍛造品	900	800	160	140
脱亜鉛対策黄銅棒＊	20	10以下	30	10

脱亜鉛対策黄銅棒＊：63Cu－2Pb－0.8Sn－0.4Ni－RemZn

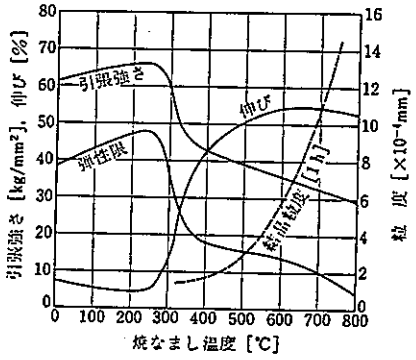


図 3.4－2　70-30 黄銅の 50% 加工材を焼なましたときの機械的性質の変化(30 分間焼なまし)[3]

$$\text{応力腐食割れ感受性指数} = \frac{\text{Cu－Zn合金の破断時間}}{\text{合金の破断時間}} \times 1000$$

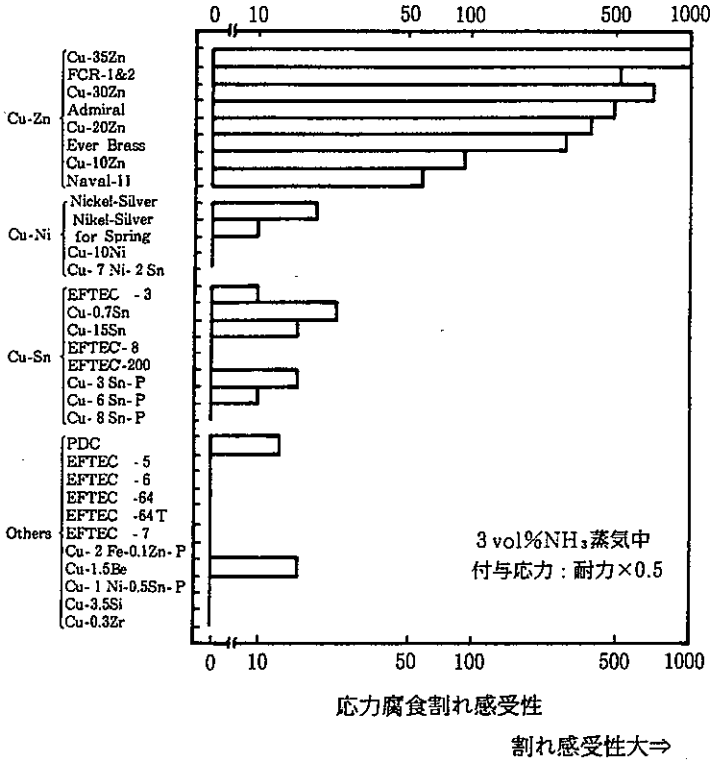


図 3.4－3　アンモニア蒸気中における各種銅合金の応力腐食割れ感受性[2]

今回の設計で採用する銅の材質は、脆化層となる可能性がある金属間化合物を生じず、水素脆化を起こさない、無酸素銅ベースの材料から選定するのが安全であると思われる。「2. 海外における検討事項」で述べたように、銅オーバーパックを採用しているスウェーデンでは、無酸素銅にPを40ppm～60ppm添加した材料を選定している。Pの効果は、クリープ特性に影響を与えると考えられるSやOの効果を抑えるとともに、再結晶温度を上昇させることであると報告されている。

P以外に無酸素銅のクリープ特性向上・再結晶温度上昇・機械的性質の改善等に寄与する可能性がある添加元素には、Mg・Zr・Cr等がある。

どの無酸素銅ベースの材料がオーバーパックに適しているかを評価することが今後の検討課題となる。オーバーパック製作に関わる評価項目として以下のものが考えられる。

- 溶接部の健全性評価
- 水素脆化試験
- 再結晶温度の評価
- クリープ性能試験

これとは別に埋設条件下における腐食に関する評価等を行って、オーバーパックに適した材料を選定する必要がある。処分環境は、埋設後の極初期には酸化環境で、その後還元環境に変化すると考えられる。耐食性評価は、酸化環境と還元環境のそれぞれに対して行うべきである。

酸化環境では、銅の局部腐食を考慮する必要がある。その評価方法として電気化学的な手法に基づいた定電位試験がある。定電位状態で長期浸漬試験を実施し、その時の電流の経時変化を測定する事によって、定電位分極曲線を描き、その条件における Passivation breakdown 電位を求める。この方法によって、Passivation breakdown 電位に及ぼすイオン濃度、pHの影響を明らかにできる。試験時における調査項目には以下のものがある。

- 腐食電流の時間変化測定
- 試験後試料の表面観察(光学顕微鏡、SEM等による観察)
- 試験後試料の皮膜のXRD解析、EPMA等による定性分析
- 試験片断面の観察による侵食深さの測定

還元環境では、硫酸イオン等の酸化性イオンが存在しなければ銅は腐食しない。処分場条件下におけるこれらのイオンの処分場内への侵入速度で腐食量を評価する方法がある。

3.5 銅の埋蔵量と最近の需給動向

銅－炭素鋼複合オーバーパックを 1 体製作するのに必要な銅は、5 章で後述するように約 2t(正味使用量、機械加工で発生した切粉等は全て回収することとする。)である。従って、オーバーパックの年間生産量を 1,000 本とすると約 2,000t/y の銅が必要となる。現在の銅資源埋蔵量と最近の銅の需給動向を調査して、高レベル廃棄物埋設開始時期に、必要量の銅を確保し加工することが可能であるかを予測した。

3.5.1 銅の埋蔵量[5]

最近の調査によると、銅資源の可採埋蔵量は表 3.5－1 に示すように全世界計で銅分約 6 億 1000 万 t と集計されている。このうち、ペルーに連なる南米アンデス山脈のカッパーベルトに世界全体の 30.6%、アメリカに 14.8%、ザンビアからザイールにまたがる中央アフリカのカッパーベルトに 10.5%が賦存していると推定されている。

埋蔵量の値は、鉱山として操業中または開発中のものの合計であるため、今後新たな鉱山が発見されると値が増えることになる。また、製錬技術の進歩や銅価格に推移によって現在廃棄されている低品位の鉱石を製錬する等の可能性がある。

表 3.5－1　世界の銅の埋蔵量[5]

国名	含有銅量(千 t)	比率(%)
チリ	163,000	26.7
アメリカ合衆国	90,000	14.8
ポーランド	36,000	5.9
ザンビア	34,000	5.6
ロシア	30,000	4.9
ザイール	30,000	4.9
ペルー	24,000	3.9
カナダ	23,000	3.8
オーストラリア	23,000	3.8
カザフスタン	20,000	3.3
その他	137,000	22.4
合計	610,000	100.0

3.5.2 現在の銅需給動向

世界の銅地金生産量と消費量[5]を表 3.5－2 に示す。最近の世界の銅地金生産量は、1200 万 t/y 程度で推移している。

我が国の銅地金と伸銅品の需給動向[6]を表 3.5－3 と表 3.5－4 に示す。最近の国内の銅地金生産量は、120 万 t/y～130 万 t/y で推移している。銅オーバーパックの素材となる無酸素銅等が含まれる伸銅品の生産量は 110～120 万 t/y である。表 3.5－4 の伸銅品生産量は、銅地金に合金成分を添加して銅合金を製造するため及び銅スクラップも原料として用いるため、表 3.5－3 の伸銅品向け銅地金生産量より多くなっている。

表 3.5－2　世界の銅地金生産量推移(単位：千 t /y)[5]

	1991 年	1992 年	1993 年	1994 年	1995 年
地金生産	10,688	11,178	11,298	11,140	11,613
地金消費	10,744	10,854	11,006	11,566	11,928

表 3.5－3　日本の銅地金の需給動向[6]

			1996 年度 実績	1997 年度 実績	1998 年度 見通し
期初在庫			129	115	120
供給	生産		1,255	1,286	1,287
	輸入		364	338	336
	再生地金等		40	51	38
	合計		1,788	1,790	1,781
需要	内需	電線	1,023	999	989
		伸銅品	476	466	457
		その他	20	20	20
		計	1,518	1,485	1,466
	輸出		155	184	190
	合計		1,673	1,669	1,656
期末在庫			115	120	125
設備能力			1,265	1,294	1,312

*1　「再生地金等」とは、内需に包括されていると推定される故銅、再生品等の消費に伴う誤差及び統計上の誤差。
*2　1997 年の設備能力は見直し調査による改定。
*3　四捨五入による誤差あり。

表 3.5－4　日本の伸銅品の需給動向(生産ベース、単位：千 t/y)[6]

品目	1996 年度	1997 年度	1998 年度
銅	555	543	536
黄銅	568	542	518
青銅	59	66	64
洋白、その他	12	12	12
合計	1,194	1,163	1,130

3.5.3　高レベル廃棄物埋設開始時期における銅需給動向の予測

単純に現在の銅資源埋蔵量を現在の世界の銅地金生産量で割ると約 45 年で資源が枯渇することになる。しかし、先に述べたように今後新たに銅鉱山が発見される可能性や低品位鉱からの製錬技術の開発が行われれば、銅資源の寿命は延びると考えられる。また今後、産業廃棄物等からの銅の回収率が高まることも予想されることから、高レベル廃棄物埋設開始時期においても世界の銅地金生産量は現在と比べて大きく変化することはないと思われる。銅－炭素鋼オーバーパックを生産するのに必要な銅の量は、現時点において国内の伸銅品生産量の 0.2%程度であるため、高レベル廃棄物埋設開始時期においてもオーバーパックの製造が銅の需給関係に大きな影響を与えることはないと考えられる。

4．オーバーパック耐圧強度に関する検討

オーバーパックの耐圧強度を検討する場合、どのような法規、規格または技術基準に基づいて検討するかが先ず問題になる。現在、オーバーパックの設計および強度評価に関する規定は海外も含め未制定であるため、現行の放射性物質を収納する機器･構造物等に関する規定／技術基準を準用して検討することになる。これに該当するものとしては、「発電用原子力設備に関する技術基準（通商産業省告示第 501 号：平成６年７月改正　以下 MITI 告示 501 号、または文面から明らかな場合は単に MITI と略す)」及びこれのベースとなった ASME　Sec.Ⅲ（American Society of Mechanical Engineers　Section Ⅲ Division 1 Nuclear Power Plant Components：1998 年１月改正　以下文面から明らかな場合は単に ASME と略す）があげられる。そこで、この二つの技術基準に基づいてオーバーパックの耐圧強度を検討することになるが、実施に当たり、先ず、両者の相違点を考察しこれまでのオーバーパック解析の考え方（荷重条件の設定、設計手法）の問題点や妥当性を検討する必要がある。

4.1　MITI 告示 501 号と ASME Sec.Ⅲとの相違点について

MITI 告示 501 号は ASME　Sec.Ⅲ に基づいて制定されたもので基本的には同じ考え方で且つ同じような内容になっているが、機器の分類方法や材料の指定方法および物性値等、細かい点について異なっている部分があるので、注意すべき主要個所の相違点について考察する。

(1)　機器の分類方法

①　MITI 告示 501 号では第１条で機器等の区分として６区分、すなわち容器、管、主要ポンプ、主要弁、支持構造物および炉心支持構造物の六つに区分しているが、ASME Sec.Ⅲでは上記のような具体的機器形状に基づく機器名での区分はなく、七つの Subsection すなわち NA,NB,NC,ND,NE,NF 及び NG の７サブセクッションから構成されておりそれぞれの内容は、General Requirements, Class 1 Components, Class 2 Components, Class 3 Components, Class MC Components, Component Su-pports 及び Core Support Structures の技術基準となっている。すなわち、ASME は容器、管、ポンプ、弁と言うような機器形状での分類はしておらず、クラス設定とクラス毎の技術基準のみ設定している。（支持構造物の２分類は告示 501 号と同じ。）

② MITI 告示 501 号第 2 条第 1 項では、第 1 種機器として 4 機種、すなわち、第 1 種容器、第 1 種管、第 1 種ポンプ、第 1 種弁を指定し、これらを原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器と定義しているが、ASME Sec.Ⅲの Subsection NB(Class 1 Components)では上記のような機器名称の記載がどこにもなく、どのような機種が Class 1 Components に該当するのか全く分からない。しかし、NRC（米国原子力規制委員会）の Regulatory Guide 1.26 では、原子力設備全体の機器（但し、格納容器を除く）を重要度に応じた品質基準により A,B,C 及び D の 4 グループに分類しそれぞれの対象機器を具体的に規定した上、さらに、各グループがそれぞれ ASME Sec.Ⅲのどのクラスの基準に基づいて設計・製作・据付・試験を実施すべきかを指定している。 例えば、NRC の A グループの機器は、原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器と定義され、これらは ASME Sec. Ⅲ NB（Class 1 Components）の条件にしたがって設計・製作・据付・試験することとなっている。したがって、結果的に、MITI 告示 501 号第 2 条第 1 項で規定する第 1 種機器は ASME Sec.Ⅲの Subsection NB(Class 1 Components)に対応することになる。しかし、MITI 告示 501 号では同じ第 1 種に区分している機器をまとめて規制している訳ではなく、或いは第 1 種の機器順に順序立てて条文を起こしている訳ではなく、第 1 種容器、第 2 種容器、第 3 種容器、第 4 種容器というふうに先ず容器についての技術基準をそれぞれのレベルに応じて設定し、次に第 1 種管、第 3 種管（第 2 種管はない）、第 4 種管があって、更にポンプ、弁が続くというふうに機種の形状によって分類し、これらに実質差をつけるため、すなわち、解析によらない場合の計算式や採用する許容値等に差を与えるため、それぞれ独立した技術基準を条文で定めている。

このように、MITI と ASME では機器の分類に関して、前者は体系別に機器を分類しているが、後者は機器分類がなく ASME の所掌外となっている。つまりアメリカ（NRC）が重要度に応じた品質基準により機器を分類し、ASME のクラスを指定している。

③ MITI 告示 501 号第 2 条第 2 項では、第 2 種容器（注：機器ではない。第 2 種機器という言葉はない。ついでに、第 4 種機器という言葉もなく第 4 種容器としているが、第 3 種機器という言葉はあり三つの機種が指定されている。）として、原子炉格納容器及びこれに接続する容器を指定しているが、ASME に対応させ

るとMC Componentsであって Class 2 Componentsではない。因みにASMEの Class 2 Components は MITI では第3種機器であり、ASME の Class 3 Components は MITI の第4種容器と第4種管であって、ASME の Class 番号と MITI の種別番号とはずれていて一致しない。(一致するのは前項②の前半で述べた部分のみ) 更に、MITI の第5種管 (放射線管理設備に属するダクト) に相当するものがASMEには規定がない。

(2) 材料と物性値

① 材料に関して考察すると、MITI告示501号では使用する材料をJIS規格の中から指定しそれぞれについて物性値 (各温度における設計応力強さ、許容引張応力、設計降伏点、設計引張強さ等) を規定しているが、ASME では JIS 規格を指定していないのは当然としても、さりとて米国規格の ASTM を直接指定しているわけでもない。後述する UNS No.毎に物性値 (最小引張強さ、最小降伏応力、各温度における設計応力強さ、各温度における降伏応力等) を与えている。したがって UNS No.とこれに対応する材料規格 (ASTM) を ASME 以外の別資料から調査し、指定された UNS No.がどの ASTM に相当するかを別途把握しておく必要がある。一例をあげると、Unified Number が S41500 の場合、Cross Refference Specifications として ASTM A176; A182(F6NM); A240; A268; A479; A815 の計6個の ASTM 規格が記載されている。

② ASMEでは、材料の物性値に関するテーブルを全て Section Ⅱに収めている。ASME Sec.Ⅲで用いる物性値等は 1998 ASME Section Ⅲ Division 1 - Appendices Appendix Ⅲで指定されているが、Appendix Ⅲには具体的な物性値の表はなく、単に、何処のどのテーブルを参照すべきかだけが記述されている。本ケースの場合、1998 ASME Section Ⅱ,Part D を参照することになっているのでここを見ると、各材料は先ず組成 (Nominal Composition) と性状(Product Form)に大分類され、次に UNS (Unified Numbering System) で整理された合金指定番号 (Alloy Designation/UNS No.) に小分類され、更に最小引張強さと最小降伏応力の組合わせによりグルーピングされている。※) そして、連続した一連の UNS 番号に対してそれぞれ物性値 (最小引張強さ、最小降伏応力、各温度における設計応力強さ、各温度における降伏応力等) を与えており、膨大な表

の集積となっている。

※）例えば、60ksi－30ksi、60ksi－35ksi、…、115ksi－90ksi、…と言う同じ強さのグループ毎にまとめられてそれぞれ数個づつ並んでいる。（但し、同じUNS No.がダブって付けられることはない。）

③　上述のようにMITI告示501号に規定する物性値をASME Sec.Ⅲとダイレクトに比較したり適用したりすることはできないが、指定されたJISの規格番号がASTMのどれに相当するかを先ず調べ、次に当該ASTMがUNSのどの番号に当てはまるかを調べて行けば対応する物性値を一応得ることができる。もし所定のASTMがUNS No.にない場合は組成と強度から該当する番号を選択することになる。しかし、ASMEでは温度は華氏（°F）、応力単位はポンドインチ（ksi）で規定しているため、各温度における許容応力等をMITIで定める摂氏（°C）、N/mm^2で求める場合、またはこの逆を行う場合は、四捨五入、比例計算（段階的に規定されている温度の仕分け区分に該当させるための内挿計算）等をすることになり、正確な換算は望めない。更にMITI告示501号では国内データーの検討結果を勘案してASME規格の値を見直している部分があるため（解説「原子力設備の技術基準」1994年 電力新報社）、MITI告示501号で設計･解析する場合とASME Sec.Ⅲで設計･解析する場合とでは多少の差が出て来る。

4.2　オーバーパックの設計･解析に関する考え方について

前項で述べたように、現在はまだオーバーパックの設計･解析に関する法規／技術基準がないため、安全上の観点からは、すなわち、放射性物質を閉じ込めて人間環境に放射線障害を及ぼさないようにするためには、原子力プラント用に制定されたMITI告示501号またはASME Sec.Ⅲに準拠して設計･解析を行うことが、現行法規/技術基準の中では最も妥当な選択と考えられる。しかし、一口にMITI告示501号またはASME Sec.Ⅲと言ってもどの条文を適用するか、つまりどのクラスに分類するかで大きく変わって来る。基本的にはMITI告示501号に準拠する場合、オーバーパックは第2種容器または第4種容器になり、ASME Sec.Ⅲに準拠する場合は、MC Components (Sub Scc.NE)またはClass 3 Components (Sub Scc.ND)となるが、これまでの考え方（設計手法･解析方法）やその妥当性と問題点について検討する。

なお、オーバーパックが第1種容器に該当しないのは、オーバーパック内には原子炉の

ように加圧された液体やガスが充填されておらず、且つ、原子炉そのものでもないので、第１種容器の要件である原子炉冷却材バウンダリを構成する機器に該当しないことがあげられる。また、第３種容器に該当しないのは、オーバーパックが原子炉を安全に停止するために必要な設備又は非常時に安全を確保するために必要な設備に該当しないためである。

一方、第２種容器は原子炉格納容器及びこれに接続する容器と規定されており、その機能として放射性物質等の有害な物質の漏洩を防止すると定義されているので、オーバーパックは原子炉格納容器ではないもののその機能が第２種容器の要件に該当するので、この点に着目すればオーバーパックは第２種容器相当と見なすことも可能である。しかし、厳密に MITI 告示 501 号を解釈すると、第１種、第２種、第３種には該当せず、結局いずれにも該当しないもののグループである第４種容器となるので、本来は、つまり MITI 告示 501 号に準拠する限りは第４種容器とすべきかもしれない。

4.2.1　これまでの考え方の概要と妥当性及び問題点

(1)　設計手法について

オーバーパックの設計及び解析に関する国内外の実施状況ならびに応力解析結果については、現段階では評価できるような詳細情報を持ち合せていないため、ここでは、従来の考え方を代表するものとして、動燃殿の「複合オーバーパックの設計研究」（PNC Z J1216 97-008）と「炭素鋼オーバーパックの試作」（PNC TN1410 92-059）を例にとる。

オーバーパックの設計及び解析に当たっては、先ず法規上の機器分類が必要となるが、前者では機器区分の特定はしないと断ってはいるものの、平板（蓋及び底）の板厚計算では MITI 告示 501 号別表第４の許容応力を採用した第２種容器の計算式を使用しているので、明らかに第２種容器となっている。

（別表第４は、ボルト材を除く第２種容器の板厚計算及び応力解析のみに使用される。注：平板の板厚計算式は第３種、第４種共同じであるが許容応力の取り方が違う。なお、第１種容器には平板の式はない。）

更に、胴の計算上の必要な厚さの式は第２種容器の式（MITI 告示 501 号第 22 条第３項）から求めていることからも第２種容器として扱っていることは明らかである。（注：第１種容器にも Pa の式を変形することによって同じ式が導かれるが、これは板厚 t が既知の場合に許容外圧 Pa を求める式であって、第２種容器のように外面に

受ける最高圧力 Pe が既知で板厚 t を求める場合とは異なる。第1種容器に規定されている Pa の式を変形して用いるのであれば、そのような断り書きと Pa 及び Pe の使い分けを明示すべきであるがそのような記述がない。したがって、蓋及び底に第2種容器の式を用いているのと同様に胴厚みの計算でも第2種容器の式を用いていると思われる。)

一方、後者は ASME Sec.Ⅲに準拠し MC Components (Sub Scc.NE)を準用するとして計算している。これは、MITI の第2種容器に相当するもので考え方は前者と同じである。因みに第2種容器は MITI 告示 501 号第2条第2項によると、原子炉格納容器及びこれに接続する容器で放射性物質等の有害な物質の漏洩を防止するために設けられるものである。

しかし、MITI 告示 501 号および ASME Sec.Ⅲに照らして正確に分類する場合は、前節 4.2 で述べたように、オーバーパックは第4種容器（ASME では Class 3 Components）に該当する。後述するように安全率の観点からは、第4種容器の方が第2種容器よりも大きいので（つまり、容器の肉厚は第4種容器とした方が厚くなるので）耐圧強度ならびに腐食代のマージンが取れるという点では第4種容器とした方が安全側の選択と言える。しかし、製造コストは勿論、処分場地上施設での搬送、検査、ハンドリング等のコストならびに地下施設での搬送、ハンドリングコストおよび付帯設備、例えば処分孔の屈削機械、ベントナイトの成形プレス等のコストが高くなる。超長期にわたる処分状況を考えた場合、地圧に十分耐えられる一定の強度と合理的な耐食層（チタンの被覆層や銅の外容器）があれば、オーバーパック本体（内容器）の肉厚の大小は処分システム上、決定的事項つまり支配的な因子とはならないと思われるので第2種容器に相当するとしても問題ないといえよう。

(2) 応力解析について

上述のようにこれまでのオーバーパックは第2種容器に分類しているが、第2種容器には、規定された計算式に基づいて設計し応力解析をしないで済ませる一般的な場合（MITI 告示 501 号第 21 条第1項）と、特別の場合として第1種容器のように応力解析を行う場合（同第 21 条第2項）の2ケースが規定されている。応力解析を実施する場合は、手順は第1種容器と同じであるが許容値の取り方が第1種容器と違っている（指定される別表が異なる）。しかし、「複合オーバーパックの設計研究」（PNC

Z J1216 97-008）では第１種容器で指定されている別表を使用しているので、設計は第２種容器としながらも応力解析は第１種容器の基準で実施している。（又は、第２種容器の特例条項第29条を適用して実質的には第１種容器の基準で解析している。解析結果は同じになる。）

一方、「炭素鋼オーバーパックの試作」（PNC TN1410 92-059）はやはり応力解析を行っているが、こちらの方は、MC Components (Sub Scc.NE)にしたがって MC Components が指定する許容値を用いて解析しているので首尾一貫して MC Components （MITI の第２種容器）として評価している。

(3) 荷重条件の設定について

荷重の種類としては内圧、外圧（外荷重）、熱荷重（熱応力）、機械的荷重（自重、管又は支持構造物からの反力その他付加荷重…MITI 告示 501 号第２条）、ボルト締付力および地震荷重があるが、オーバーパックに作用する荷重としては従来から処分深度における岩盤の地圧のみを考慮している。これは、オーバーパック内には加圧された流体がないため内圧は無視できること、熱膨張を拘束するものがオーバーパック外周にないため熱荷重も無視できること、機械的荷重や地震荷重も無視できること、ボルトは使用していないこと、による。したがってここでは外圧に着目して検討する。（本研究では蓋の取付けにボルトを使用しているが、蓋はオーバーパック本体とインロー構造としているのでボルトに直接外力が作用することはない。厳密にはインロー部にクリアランスがあるため、蓋に外圧が作用してずれ、クリアランスが０になるまではボルトに外力が作用するがそれ以降は蓋とオーバーパック本体とが密着するためボルトには力がかからない。）

オーバーパックに作用する外圧は、地質環境、処分深度、定置方式、人工バリアの膨潤状況、オーバーパック自身の腐食状況(発生ガスの蓄積圧、腐食膨張によるベントナイト等緩衝材の反力等含む)、その他の状況によりに変わって来るが、現在までに検討されているオーバーパックへの外圧の考え方はおおむね次の通りである。

① 岩盤は堆積岩、結晶質岩を問わずクリープ変形し、岩盤の初期地圧が人口バリアに作用する。したがってオーバーパックには、地上からオーバーパックまでの全岩盤の荷重が作用する。

② このうち垂直にかかる圧力（σ_v）は、オーバーパックにかぶさって来る岩盤

の飽和密度(湿潤密度 ： ρ_s)とオーバーパックから地上までの高さすなわち処分深度（H）の積（$\sigma_v = \rho_s \times H$）として求め、水平にかかる圧力（$\sigma_h$）は、側圧係数をλとして垂直圧力のλ倍とする。（$\sigma_h = \lambda \times \sigma_v$）

③　上記 ρ_s およびλの値については、動燃殿の過去の研究成果[1]では ρ_s = 2.8g/cm^3、λ＝2を採用しているが、レファレンスケースとして ρ_s=2.65g/cm^3、λ＝1.32を提示されている。

④　一方、INTEGRATE '97で発表された外圧の考え方(東京電力)として、各種荷重の組合わせによりオーバーパックに作用する外圧を設定する提案がなされている。これによると処分場の地質を、岩盤がクリープすると考える堆積岩と、クリープしないと考える結晶質岩とに大別し、更にそれぞれを緩衝材（ベントナイト）がスウェリングした後とオーバーパックが腐食した後とに分けて、各ケース毎に各種荷重の組合わせを提案している。この考え方の特徴は、上記各ケースで選定した荷重に必ずオーバーパックの腐食ガス圧を加算していることである。例えば、処分場の地層が堆積岩で緩衝材（ベントナイト）が飽和膨潤した後の状態においては、「地圧」と「膨潤圧＋静水圧」とを比較検討してその大きい方を選び、これとガス圧の和がオーバーパックに作用する外圧としている。

なお、本研究では膨潤圧やガス圧等の情報がないため上記提案は検討せず、③のレファレンスケースを採用した。

(4) 妥当性及び問題点

先ずオーバーパックの重要度分類であるが、(2)で述べたようにオーバーパックを設計･解析する場合、どのクラス（第何種容器）に分類するかで大きく変わるので、従来実施してきた第2種容器相当の選択が妥当かどうか、どのような問題点があるかを考察する。

従来から第2種容器並みとして第1種容器相当としていないのは、既述のように、オーバーパック内に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、且つ、原子炉そのものでもないので、第1種容器の要件である原子炉冷却材バウンダリを構成する機器に該当しないこと、また、第3種容器相当としていないのは、オーバ

ーパックが原子炉を安全に停止するために必要な設備又は非常時に安全を確保するために必要な設備に該当しないためであろう。

一方、第２種容器は既述のように、原子炉格納容器及びこれに接続する容器と規定されており、その機能として放射性物質等の有害な物質の漏洩を防止すると定義されているので、オーバーパックは原子炉格納容器ではないもののその機能が第２種容器の要件に該当するので、この点に着目して従来からオーバーパックは第２種容器相当と見なして来たと思われる。同じように考えるなら、オーバーパックはその性格上（半減期が極めて長い高レベルの放射性物質を含み人間環境から隔離しなければならないいう性格上）、最重要度分類に区分けし第１種容器相当としても妥当と思われる。一方、厳密に MITI 告示 501 号を解釈すると、第１種、第２種、第３種には該当せず、結局、いずれにも該当しないもののグループである第４種容器となるので、本来は、つまり、MITI 告示 501 号に準拠する限りは第４種容器とすべきかもしれない。現在これに該当する例としては、使用済燃料貯蔵プール、ほう素除去脱塩塔、使用済樹脂貯蔵タンクなどがある。

ただ、第４種容器の場合、応力解析はしなくても良いことなっており、解析に必要な許容応力値等の規定もないため、仮に第１種容器または第２種容器の許容応力値等を使って応力解析をしたとしてもその妥当性を立証するのにかなりの労力を要する。さりとてオーバーパックの特殊事情を考えた場合、応力解析は無視できず、結局、現在までのところ第２種容器に準拠してきたと思われる。

この場合、応力解析に用いる許容値の取り方としては、前述のように第２種容器のうちの解析を必要とするもの（ｉ．第２種容器の規格に規定されていない荷重により著しい応力を生ずる部分、ii．第２種容器の規格に規定されていない形の部分）に準拠してこれに規定された許容値を採用する方法と、第２種容器の特例条項（第 29 条）を適用して第１種容器に規定されたものを採用する方法がある。

前者の方法を採用したのは「炭素鋼オーバーパックの試作」(PNC TN1410 92-059) で、後者を選択したのは「複合オーバーパックの設計研究」（PNC Z J1216 97-008）であるが、後述する安全率の観点から見ると、第１種容器の方が第２種容器よりも安全率が小さいので、（つまり、第１種容器の方が容器の肉厚を薄くできるので）第１種容器なみに応力解析をする方が容器にとっては緩やかな（厳しくない）評価となる。

製造コストの面から見ると第 1 種容器の基準を準用して設計する方が、解析に相

当な労力を費やすもののオーバーパックの肉厚が少なくなる関係で、製造コストの面からも、処分に至る一連の工程における諸々のコストの面からも、経済性が優位となる。しかも、長期にわたる処分状況を考えた場合は、所定の地圧に十分耐える強度と合理的な耐食層（保守的な厚みを持ったチタンの被覆または銅の外容器）があれば、必要以上のオーバーパック本体（内容器）の肉厚の大小は処分システム上、決定的事項（支配的な因子）とはならなくなると思われるので、最初から第１種容器を準用するという考え方もできる。本研究ではこうした考え方に立って、重要度分類から見ても材料検査の徹底ぶりから見ても第１種容器に準じるのが適切と考え、これに準拠して設計および応力解析を実施した。

因みに第１種容器は、軸圧縮荷重による坐屈解析以外は、原則として「解析による設計（Design by Analysis)」の考え方に立ち、ASME Sec.Ⅲ Class 1 Components をベースとした技術基準になっている。したがって、第２種容器（解析が義務づけられる既述の特殊形状ｉ、ⅱを除く)、第３種容器、第４種容器のように一般的に実施されている従来型の計算式に基づく設計（Design by Formula）とは異なり、第１種容器ではトレスカの最大せん断応力説に基づいた解析手法を採用している。例えば、設計条件では、許容応力の代わりに設計応力強さ（Sm）が与えられ、応力解析によって求められた各種の応力強さ（一次一般膜応力強さ、一次局部膜応力強さ、一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さ）が Sm の n 倍以下と規定されている。（n は、応力強さの種類、組合わせの種類、運転状態等によってそれぞれ設定されている。）

ここで注意しなければならないのは、応力（stress）と応力強さ（stress intensity）とは全く異なった概念（尺度）と言うことである。特に応力強さに関しては、応力がベクトルの一種で、厳密には、ベクトルが３成分(x,y,z)の方向を持っているのに対し、応力は９成分[*1] の応力が同時に作用しているテンソルであるとの現実に立って、相当応力（equivalent stress）の考え方を導入している関係で従来の一般的な応力とはかなり違ったニュアンスとなっている。

なお、上述の中で、坐屈解析以外は原則として「解析による設計（Design by Analysis)」としたのは、部分的には形状によって与えられた計算式（図表含む）に基づいて計算すること（Design by Formula）になっており、第１種容器が全て解析による設計ではないからである。(例えば、穴と補強)

*1　実際には共役関係にある $\tau_{yx}, \tau_{zy}, \tau_{xz}$ は除いて $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ の6成分で扱われる。

4.3　安全率の設定に向けた方向付けの検討

安全率は引張強さを許容応力（又は設計応力強さ）で割ったものであるが、使用する材料やその用途および使用条件、運転状態（環境）等によって大きく変わって来る。ここでは放射物質の閉じ込め機能を重視した原子力関係の法規、技術基準に焦点をあてて ASME Sec.Ⅲ や MITI 告示 501 号がどのような安全率を設定しているかを考察し、オーバーパックの安全率設定に向けた方向付けの検討を行う。

(1) ASME の安全率

ASME では設立当初(Sec.Ⅰ Power Boilers)から暫くの間、安全率を5としてきた。これはアメリカでボイラーの爆発事故がしばしばあったことが背景にある[(2)]。しかし、その後の材料の進歩や品質の向上等によって安全率は4に引き下げられた。更にその後の研究や試験等により、構造物の形状や使用条件、運転状態によっては必ずしも安全率の高い方が良いとは限らないという指摘が出され[(2)]、安全率の見直しが行われてきた。現在（1998 年1月）は次のようになっている。

（ASME 制定から暫くの間　安全率5）[(2)]

Sec.Ⅲ	Class 1 Components	安全率 3
	Class MC Componentes	安全率 4/1.1 = 3.64
	Class 2 Components	安全率 4
	Class 3 Components	安全率 4

上記から矛盾しているように感じることは、重要度分類では最上位にある Class 1 Components の安全率が一番小さく、したがって容器の肉厚が薄くなるという点である。しかし、Class 1 Components の設計手法は解析による設計（Design by Analysis）で、起こり得る破壊様式をすべて考え、それぞれのケースに対する Components の健全性を解析によって詳細に評価し、各ケースとも定められたそれぞれの応力強さの限度に入っていることを確認する手法である。したがって、見かけ上、安全率が小さくても健全性が損なわれることはない。

(2) MITI 告示 501 号の安全率

既述のように MITI 告示 501 号は ASME Sec.Ⅲをベースとしているので基本的には同じ考え方になっている。現在（平成 6 年 7 月改正）の安全率は次の通り。

（解説 原子力設備の技術基準 1994 電力新報社）

第 1 種容器	安全率 3
第 2 種容器	安全率 4/1.1 = 3.64
第 2 種容器のうち特例条項（第 29 条）を適用する場合	安全率 3
第 3 種容器	安全率 4
第 4 種容器	安全率 4

ASME 同様、上記からやはり矛盾しているように感じることは、重要度分類では最上位にあるはずの第 1 種容器において、安全率が一番小さく、したがって容器の肉厚が他の容器よりも薄くなるという点である。しかし、第 1 種容器の設計手法は ASME Sec.Ⅲ同様、解析による設計（Design by Analysis）の思想に基づいており、起こり得るあらゆる破壊様式をすべて考え、それぞれのケースに対する容器の健全性を解析によって詳細に評価し、それぞれに規定された応力強さの限度に入っていることを確認する手法である。したがって、見かけ上は安全率が小さくても健全性が損なわれることはない。これは、第 1 種容器には使用できる材料が規定されていて、それぞれの材料について破壊靭性試験および超音波探傷試験、放射線透過試験、渦流探傷試験、磁粉探傷試験、浸透探傷試験等の非破壊試験が義務づけられており、他の容器の検査内容に比べ非常に厳しい規制になっていることからも裏付けられる。

なお、安全率 3 を与えられた第 1 種容器では基本的には弾性領域ではあるが、シェイクダウンで見られるように部分的に塑性領域に達することが許容されており、塑性ひずみを容認している。また、解析の結果、所定の許容応力（応力強さ含む）を満足しない部分がある場合に備えて救済規定が設けられている。具体的には、一次応力と二次を加えて求めた応力強さが 3Sm を超えた場合は、弾塑性解析を実施してここで規定する許容値を満足すれば良いとする救済条文（第 14 条）がある。これから分かるように、安全率 3 は必ずしも裕度のある値ではなく最低限度の規定であることを示している。したがって、これ以下の安全率は望めない。

また、逆に、ASME 設定当初の安全率 5 では、必要以上の肉厚となる結果、製造コストは勿論、処分に至るあらゆる工程でのコストが高くなり経済性が問題となる。

以上の考察の結果から、オーバーパックの適切な安全率の設定に向けた方向付けとしては、現行 MITI 告示 501 号第１種容器並みの材料検査と解析による設計を前提とした第１種容器の安全率、すなわち３をベースとした基準体系が望ましいと思われる。

4.4 設計手法の確立に向けた方向付けの検討

既述のように、オーバーパックの設計･解析基準は現在のところ海外も含めて未制定であるため、ASME Sec.Ⅲや MITI 告示 501 号に準拠してこれまで設計研究が行われてきた。そして本研究でも MITI 告示 501 号に準拠して実施している。そこで、これまでに得た知見を基に、オーバーパックの設計手法の確立に向けた方向付けの検討を行う。

(1) 参考とすべき現行の技術基準の選定

オーバーパックの設計に関して新しい技術基準の制定を検討する場合は、やはり放射性物質を閉じ込め人間環境へ放射線障害を及ぼさないようにとの安全上の観点に立って原子力プラント用に制定された ASME Sec.Ⅲベースの MITI 告示 501 号を参考にるのが望ましい。ASME Sec.Ⅲそのものに準拠して検討することも考えられるが、我が国の場合、材料が JIS 規格となっており各種単位（℃ 、N/mm^2）も ASME の単位系(° F 、ksi)とは異なっているため簡単ではない。さらに、MITI 告示 501 号では、ASME の許容応力（応力強さ含む）を国内の試験や実績に基づいて部分的に見直しているため、我が国の実状に適した合理的な基準となっている。したがって、オーバーパックの技術基準は、MITI 告示 501 号を参考にするのが望ましい。この場合、オーバーパックが半減期の長い大量の高レベル放射性廃棄物を収納しているこのに鑑み、重要度分類の最上位にある第１種容器相当と位置づけ、解析による設計を導入することが賢明である。多大な労力を費やす応力解析や徹底した各種材料検査が義務づけられるが、安全率が３に設定できる結果、オーバーパックの肉厚が少なくなって製造コストが引き下げられるだけでなく、形状が一回り小さくなって軽量化するため地上施設での搬送、検査、ハンドリング、および地下施設での搬送、ハンドリング等における諸々のコストが低減でき、さらにそれぞれに関連する付帯設備、例えば、処分孔の掘削機械、ベントナイトプレス設備等、幅広くコスト低減が可能となり経済的に有利である。したがって、オーバーパックの設計手法としては、前章の 4.3 で述べて安全率の点からも、MITI 告示 501 号の第１種容器をベースとしたものが望ましく、

且つ、半減期の長い高レベル放射性物質を多量に含むというオーバーパックの特殊事情項に適合させるべく、次項に掲げる追加要件と変更事項とを満足した新たな技術基準を確立する必要ががある。

(2) 考慮すべき追加要件および変更事項

MITI 告示 501 号第 1 種容器では、使用環境に伴う環境効果の評価基準が示されていない。また、時間に依存する現象に関しても対応していない。一方、オーバーパックは長期にわたり深地層に処分されるので、かかる環境におけるオーバーパックの健全性を評価するめの基準体系が必要となる。そして第 1 種容器と同様、これに基づいた解析による設計が求められる。したがって、MITI 告示 501 号第 1 種容器の技術基準をベースに追加すべき要件、すなわち、オーバーパックの強度および構造評価に必要な準備すべき基本事項を以下に示す。

① 深地層環境下での耐食性・侵食性に関する解析指針と評価基準の設定

② 放射線照射による材料劣化に関する解析指針と評価基準の設定

③ クリープ疲れ、クリープ坐屈に対する解析指針と評価基準の設定

④ 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の設定

⑤ 材料の不安定化に対する解析指針と評価基準の設定

⑥ 地殻変動に対する解析指針と評価基準の設定

⑦ その他

また、現行第 1 種容器の運転状態として、「運転状態Ⅰ」、「運転状態Ⅱ」、「運転状態Ⅲ」および「運転状態Ⅳ」が規定されているが、オーバーパックの深地層処分に適合するような言葉と定義に変更することが必要ある。例えば、「正常状態」および、腐食･侵食等が強度に及ぼす影響を評価するための「仮想的損傷状態」等に分類し各状態の定義をする必要がある。

以上の検討結果から、オーバーパックの設計手法の確立に向けた方向付けとして、現行 MITI 告示 501 号をベースに、上記に示す新たな解析指針と評価基準を準備して総合的な基準体系を作るべきと思われる。

5．銅 － 炭素鋼複合オーバーパックの設計

5.1 構造概念の構築

5.1.1 オーバーパックの形状について

オーバーパックの形状を考慮するに当たって下記のような項目を考慮する必要がある。

① 耐圧性の良い構造であること

②製造コストが低いこと

③ コンパクトな形状であること(埋設効率が良い)

④ 定置時の安定性が良いこと(但し低レベル、TRU 等他廃棄体と比べ発熱量が大きいため多段積みでの埋設は検討されていないためこれについては考慮しない)

⑤ ハンドリング性（移送性、運搬性）

⑥ ベントナイトブロックの施工が容易であること

上記のような項目について、オーバーパックの現実的な形状である円筒形と角柱形についての比較を表 5.1－1 に示す。

表 5.1－1　オーバーパックの形状による比較

	円　筒　形	角　柱　形
耐圧性の良い構造	○	×
製造コストが低い	○	×*
コンパクトな形状	○	×
定置時の安定性	△	○
ハンドリング性	○	○
ベントナイトブロックの施工が容易	○	○
総 合 評 価	○	×
備　　考	構造がコンパクトになり、加工コスト上も有利。但し、横置きにした場合の安定性に欠けるが、円筒半割り型のベントナイトを事前に施工する等で対応は可能。	定置の際の安定性では優れているものの所定の耐圧性を持たせようとした場合、円筒形よりも大きな構造となってしまう。また、加工コストにおいても円筒形の方が有利である。

* 角柱形の製造コスト増の主な要因としては下記のようなものが考えられる。

1) ガラス固化体が円筒形であり角柱型では収納効率が悪くなってしまう。そのため容器が大きくなりベントナイト等も含めた処分費用が大きくなる。
2) 耐圧性を考慮すると円筒型と比べ容器が厚肉構造となってしまう。
3) 溶接箇所が増えてしまう。

以上の比較より、形状は円筒型とする。

5.1.2 外層の加工方法及び構造の検討

オーバーパックの構造を検討するに当たっては、銅 – 炭素鋼の複合構造であることを念頭に、どのような加工方法を選択するかにより決定することが必要である。そこで、複合オーバーパックに適応し得る代表的加工手順について外層(無酸素銅)の加工を主体とする手順のフロー図を作り、その中で使用される加工方法が耐食性を持った層を作る上で現実的な方法であるかどうかの検討を行い外層の加工方法を決定する。また、その検討結果に従い、外層の構造についても決定する。

(1) 複合材曲げ加工を用いた加工手順

複合材曲げ加工を用いた加工手順例のフロー図を図 5.1-1 に示す。これらの加工手順において最も問題となるのが、複合材の曲げ加工である。本検討において内容器の厚み設定の見直しを行っているもののその厚みは、120mm と厚く(5.2 章参照)所定の径(内径φ440)に曲げることは不可能である（φ440 の径の場合厚さ４０～５０mm 程度が限界)。したがって、本加工手順での適応は不可と考える。

(2) 被膜加工を用いた加工手順

被膜加工を用いた加工手順例のフロー図を図 5.1-2 に示す。これらの加工手順において最も問題となるのが被膜加工技術の銅 – 炭素鋼複合オーバーパックへの適応の可否である。現在適応可能と思われる代表的被膜加工技術について表 5.1-2 に示す。いずれの方法においても、現行の技術においてはオーバーパックに求められる被膜の厚み(数十 mm)への適応は非常に困難である。また健全な耐食層の生成との観点から、酸素の混入を防ぐため窒素雰囲気で加工を行う等の新規開発要素を加味する必要もある。したがって、本加工手順での適応は非常に困難であると考えられる。

(3) 熱間等方圧加圧(HIP) を用いた加工手順

熱間等方圧加圧(HIP) を用いた加工手順例のフロー図を図 5.1-3 に示す。これらの加工手順において最も問題となるのが熱間等方圧加圧(HIP)加工技術の銅 – 炭素鋼複合オーバーパックへの適応の可否である。熱間等方圧加圧(HIP)加工技術についての説明を表 5.1-3 に示す。現行国内の設備においては、円筒部の加工は不可である。また加工において加圧・加熱後に徐冷(約 800℃から常温まで約７～９時間かけて冷却)を行う必要があり、銅の粒径が大きくなることが避けられず、外層継ぎ目部の溶

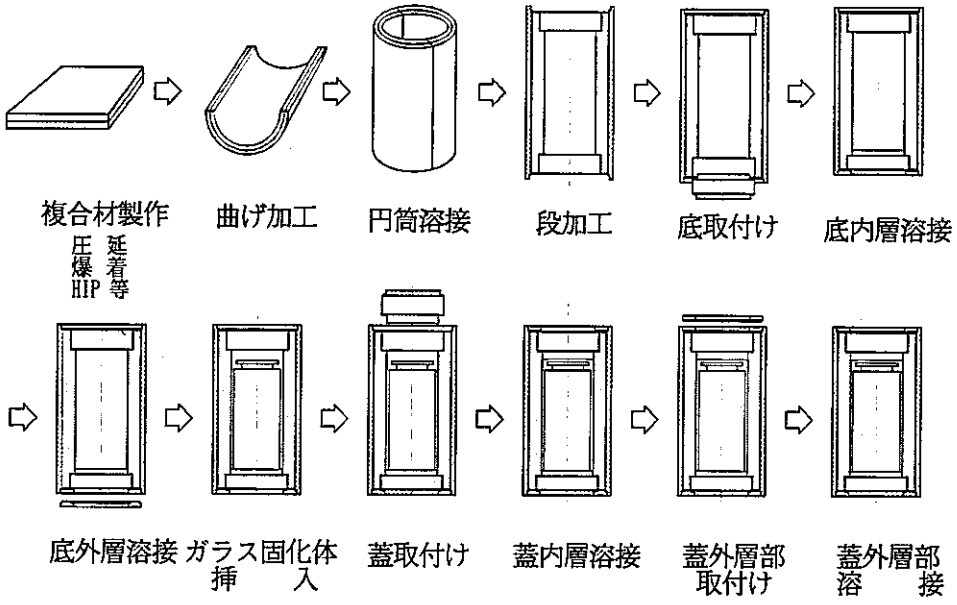


図5.1-1 複合材曲げ加工を用いた手順例フロー図

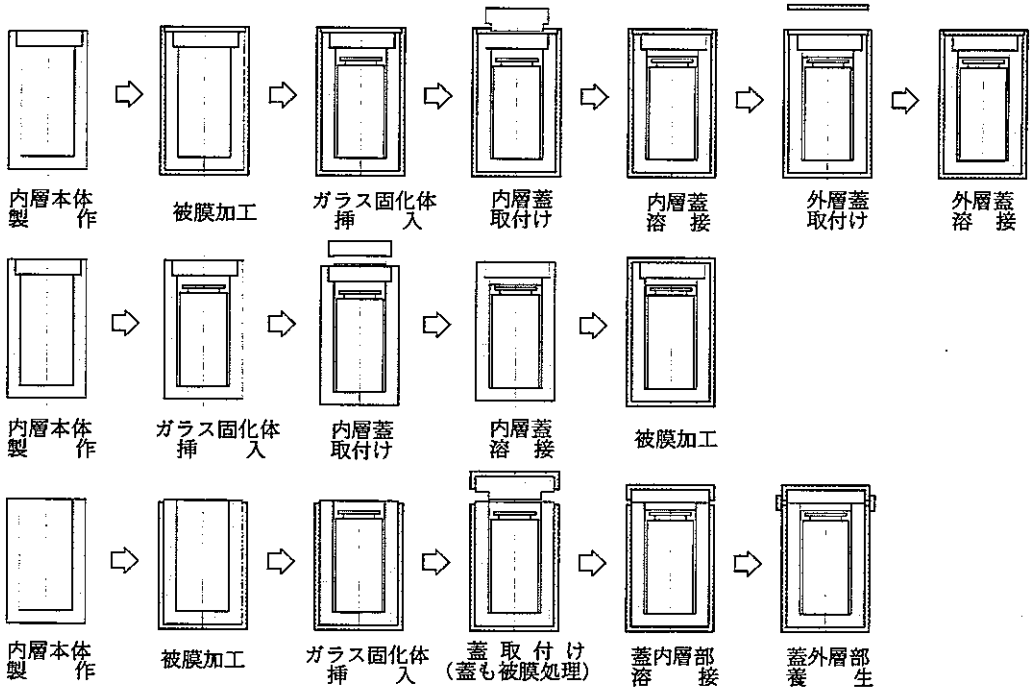
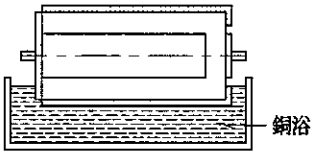
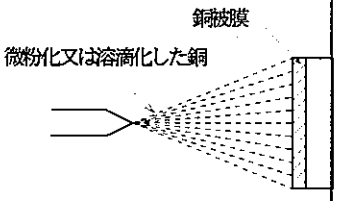
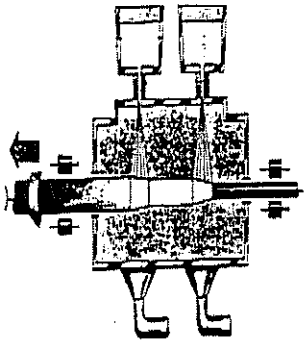


図5.1-2 被膜加工を用いた加工手順例フロー図

表 5.1－2 銅 － 炭素鋼複合オーバーパックへ適応する代表的被膜加工技術

加工方法	長所	短所	備考
1．銅の厚肉メッキ法  	溶接を行わずに気密性のある耐食層が出来る可能性がある。	銅に酸素が溶け込んだり気泡の発生があり、耐食層として使う被膜を作るのはかなり困難。また、コストもかなり高くなる。	類似法に電着法があるがSKB Tech.Report91-38によると電着速度は0.03 mm/h で厚い耐食層の形成は無理と報告されている。
2．溶射法  	溶接を行わずに気密性のある耐食層が出来る可能性がある。	現段階では厚膜の生成には開発要素が残っている。また、銅へ酸素が溶け込んでしまう可能性が高く、加工の際、周囲の雰囲気に配慮する必要がある。	スウェーデンのサンドビック社ではこの方法により、直径400ミリ、長さ 8 m の特殊合金鋼製円筒を製造している。

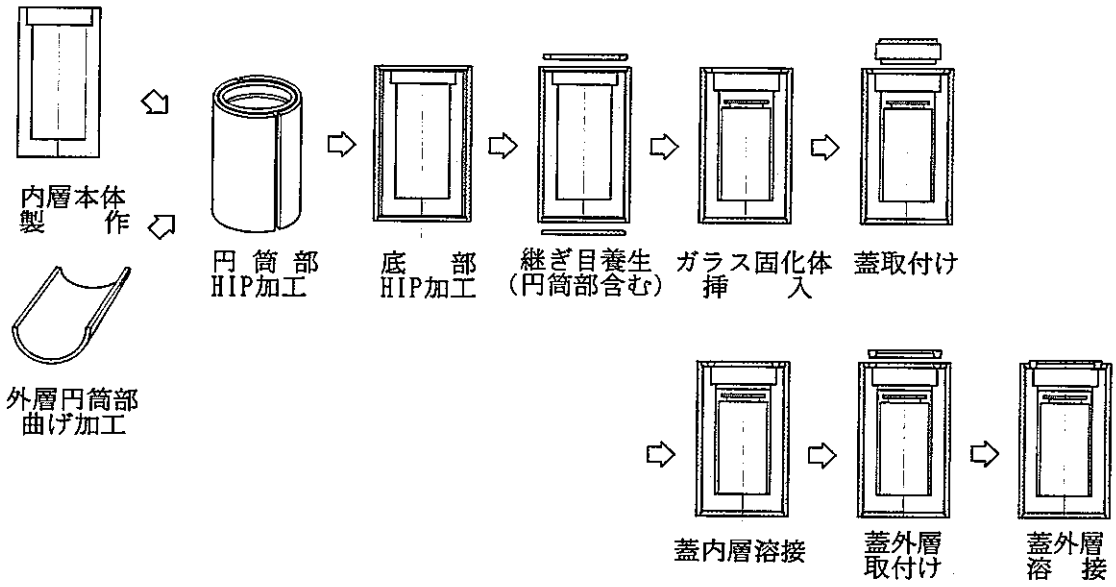
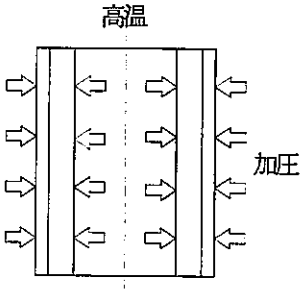
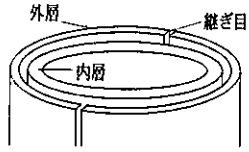
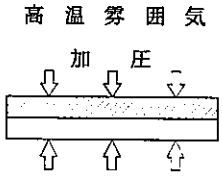


図5.1-3 熱間等方圧加圧(HIP) を用いた加工手順例フロー図

表 5.1－3 銅－ 炭素鋼複合オーバーパックへ適応する熱間等方圧加圧(HIP) 法

加工方法	長　所	短　所	備　考
1.円筒部  	銅の板を接合するため外層に不純物の混入がない。	加熱接着後、徐熱を行うため結晶粒が成長してしまう。また、現行円筒でφ660 に対応出来る設備がない(MAX. 約φ600)。板の継ぎ目に追加工が必要（下図参照)。  	SKB の基礎実験は、(TechnicalReport'91-38)本技術の実現の可能性があることが確かめられている。
2.底部・蓋部  	銅の板を炭素鋼と接合するため銅に不純物の混入が発生しない。現行の設備でもφ600 程度までは加工可能。	加熱接着後、徐熱(約800℃から常温まで約7～9時間かけて冷却)を行うため結晶粒が成長してしまう。	

接加工後の検査が著しく困難になることが予想さる。したがって、本加工手順での適応は非常に困難であると考えられる。

(4) 爆着を用いた加工手順

爆着を用いた加工手順例のフロー図を図 5.1-4 に示す。これらの加工手順において最も問題となるのが、爆着加工技術の銅–炭素鋼複合オーバーパックへの適応の可否である。現在の爆着加工技術の銅に対する適応性について表 5.1-4 に示す。この表で述べた通り、銅の爆着は技術的には不可能ではないもののほとんど実施されていないため本技術を実施するためには、爆着加工の際の適正条件を求めることから行う必要がある。また、円筒部における爆着は他の金属においても実施されておらず、現実的ではないと考えられる。更に、ガラス固化体を収納後に遠隔で本加工を実施することは現実性に乏しい。以上のことから、本加工手順での適応は現実的でないと考えられる。

(5) 焼きばめを用いた加工手順

焼きばめを用いた加工手順例のフロー図を図 5.1-5 に示す。これらの加工手順において最も問題となるのが焼きばめ加工である。焼きばめ加工は一般に広く行われている技術であり、複合オーバーパックの大きさを考慮した場合でも、量産時におけるコストダウンを図りにくい技術ではあるものの十分対応可能な技術であると考えられる。銅-炭素鋼複合オーバーパックへの適応性を考えた場合、加熱による銅粒子の成長が問題となるが、熱間等方圧加圧(HIP)と比べた場合、加熱温度も低く加工後の冷却についても徐冷を行う必要はないため銅粒子の成長を抑えることが出来る可能性は高い。従って、本加工手順は適応し得る可能性があるものと考えられる。

(6) 内層・外層を別構造とした加工手順

内層・外層を別構造とした加工手順例のフロー図を図 5.1-6 に示す。これらの加工手順において問題となるのが外層円筒部の加工方法と底部及び蓋部の加工方法(溶接方法)である。外層円筒部の加工方法について表 5.1-5 に示す。現行の国内設備において対応不可の加工方法もあるが将来対応は可能と考えられる。また、代表的溶接方法を表 5.1-6 に示す。これら溶接方法のうち外層の溶接方法として、溶接棒を使わず酸素の溶け込みも防ぐことの出来る電子ビーム溶接を用いることにより健全な耐食層の加工が可能と考えられる。従って、本加工手順は適応し得る可能性があるものと考えられる。

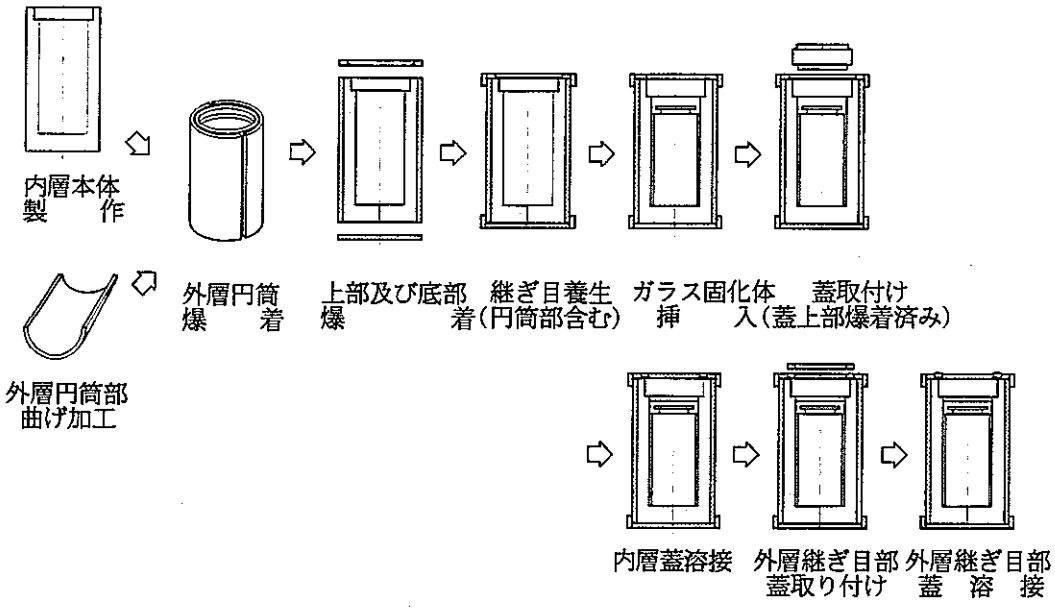
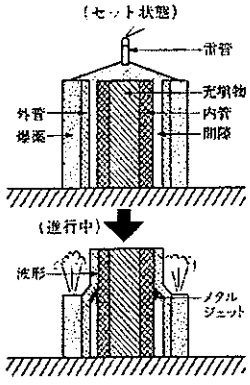


図5.1-4 爆着を用いた加工手順例フロー図

表 5.1-4　爆着加工技術の銅に対する適応性について

加工方法	長　所	短　所	備　考
1．銅リング爆着法  	銅の板をを接合するため外層に不純物の混入がない。	現行円筒状のものへの爆着は実績がほとんどない。また、現行銅の爆着はほとんど行われていないため、火薬の量、クリアランスの設定方法について検討・試験による確認が必要。	
2．　銅板爆着法 	銅の板を炭素鋼と接合するため銅に不純物の混入が発生しない	現行銅の爆着は実績がほとんどないため、火薬の量、クリアランスの設定方法について検討が必要。また、遠隔化を図ることは非常に困難。	

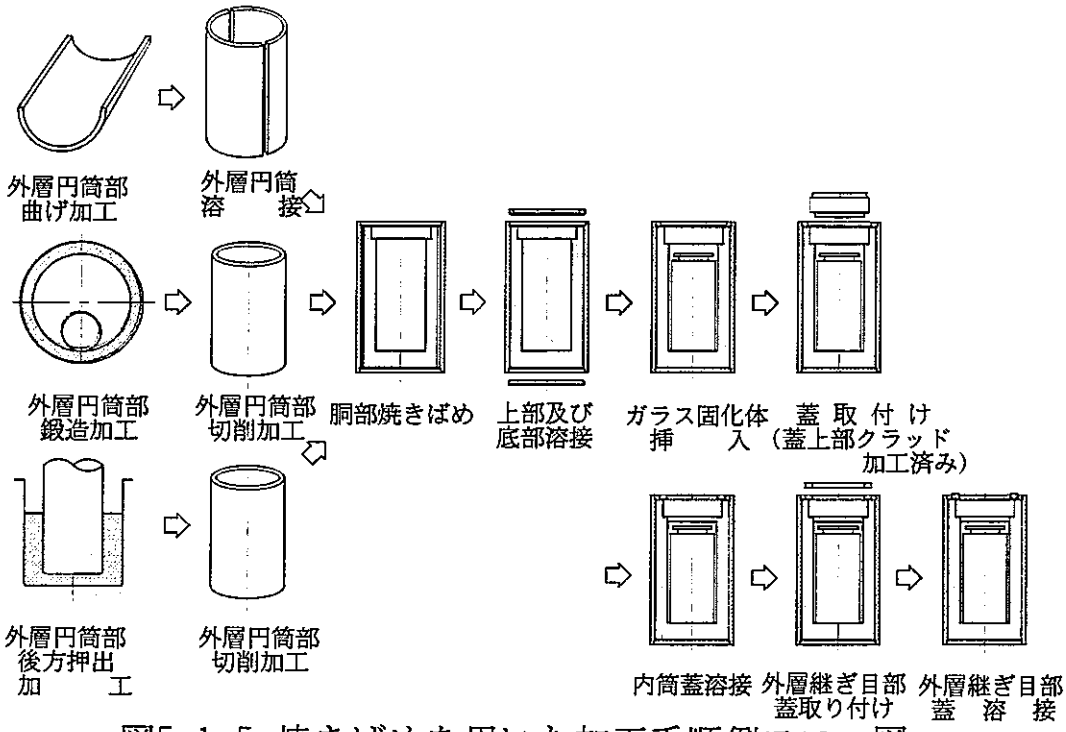


図5.1-5 焼きばめを用いた加工手順例フロー図

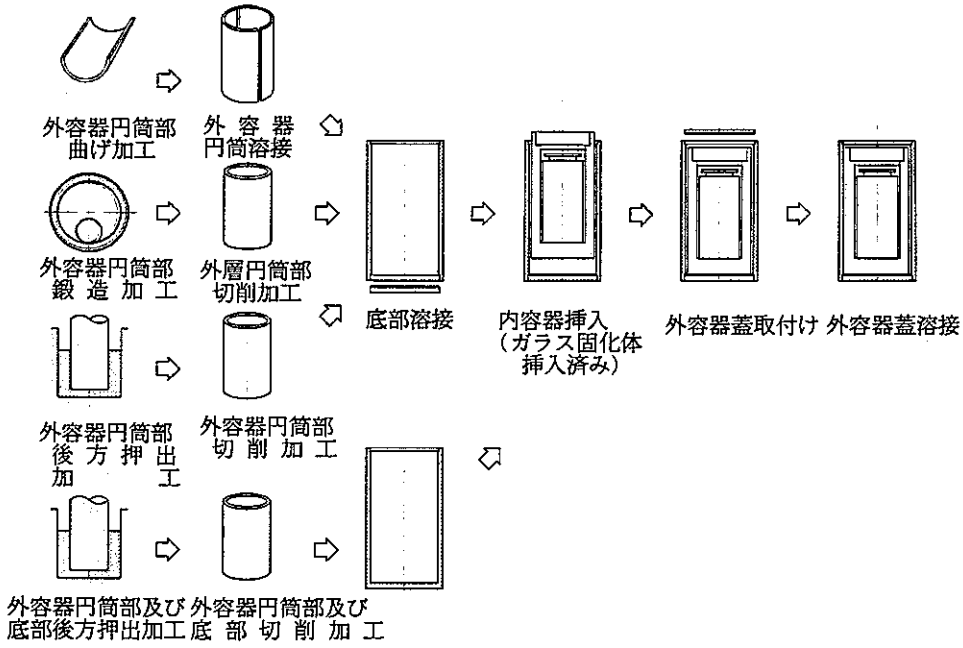


図5.1-6 内層・外層を別構造とした加工手順例フロー図

表 5.1－5(1)　外容器円筒の加工方法 (1)

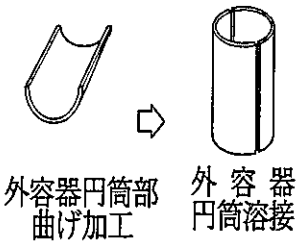
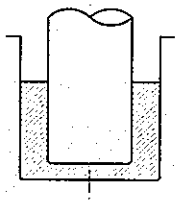
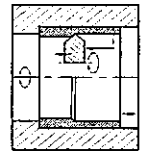
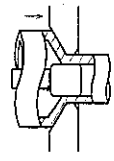
加工方法	長　所	短　所	備　考
1．円筒溶接法  外容器円筒部曲げ加工　外容器円筒溶接	圧延で所定寸法に仕上げた平らな銅板を、ロールで円筒状に丸める方法である。比較的容易に作ることができ、コストも安い。	オーバーパック本体に接する内径の寸法精度、真円度、円筒度、真直度等が比較的悪く、スリット部を溶接する際、歪みが生じるので歪み取りが必要となる。 形状的に円筒溶接部の検査性は悪い	英国 TWI 社では直径600mm, 肉厚 100mmのモックアップに成功している。
2. 熱間押出しによる円筒加工法 	銅のビレット（太い中実状の棒）を高温に加熱した上、押出し機により押出してリング状パイプを作る方法で、十分な強度と寸法精度を持った継ぎ目のない管が得られる。	銅粒子の成長を防ぐため加工前材料粒子を微粒化しビレットの加熱温度と適切な押出し温度の管理が求められる。現行国内設備では後方押し出しで長さ 1.2～1.3 mが上限(押し出し機械のストローク)。 径・厚みは対応可能	SKB の経験(Technical Report'91-38)では押出し温度が高い場合、結晶粒経が仕様値より大きくなった。(対策を施す予定)
3. 鍛造法	あらかじめ穴の空いた材料を鍛造して穴の径を大きくする加工法。 熱間押出し法などと比べ銅に対する加熱温度を低く抑えることが出来る	現在国内で加工可能な長さは 0.7～0.8m 程度。 径・厚みは対応可能	鍛造法の一種として下記の様なものがある。 (スピニング法) 外周を固定しながらその内面をしごいてパイプを作る。  (回転式外周鍛造法) 回転するマンドレルを挿入しリングを回転させながら外周をしごく 

表 5.1－5 (2)　外容器円筒の加工方法 (2)

加工方法	長　所	短　所	備　考
4. 熱間押出しによる円筒底一体加工法	銅のビレット（太い中実状の棒）を高温に加熱した上、押出し機により押出してリング状パイプを作る方法で、十分な強度と寸法精度を持った継ぎ目のない管が得られる。 底部の溶接が不要で底部の溶接検査も不要	銅の粒子の成長を防ぐため(UT 検査を前提)ビレットの加熱温度と適切な押出し温度の管理が求められる。 現行の国内設備では後方押し出しで長さ1.0m程度が上限(均一な組成を得るための連続鋳造による最大鋳塊による制限)。 厚みは対応可能。径は高さとの相関関係有り。	SKB ではリング加工のみの検討で底部まで含めた検討は行われていない

表 5.1－6 (1)　主な溶接方法の比較 (1)

加工方法	長　所	短　所	備　考
1.サブマージドアーク溶接 ①	母材上に溶剤を置き、これに心線を突っ込みアークを発生させるこのアーク熱により心線および母材の一部が溶融し溶剤の精錬作用により清浄な溶着金属を得ることができる。	溶剤に含まれる添加物が溶け込んでしまう。	
2.ＴＩＧ溶接 ②	不活性ガス気流中で溶接を行う不活性ガスアーク溶接法の一種でタングステンを電極にし、溶接棒を外から供給する方法。酸化，窒化に敏感な材料の溶接に適する。	入熱の集中性においてＭＩＧ溶接に劣るため高速・高能率溶接には適さない。溶接棒を使うため溶接棒中の添加物が溶け込んでしまう。	

表 5.1－6 (2)　主な溶接方法の比較 (2)

加工方法	長　所	短　所	備　考
3.MIG 溶接 ③	不活性ガスアーク溶接法の一種で心線を電極にする。入熱の集中性が高く深い溶け込みが容易に得られ、高速・高能率溶接が可能。	溶接棒を使うため溶接棒中の添加物が溶け込んでしまう。	
4.ろう付け	ろう材を加熱して溶かし接合を行う。非金属材料など多種のものの接合に適する。	ろう材に含まれる添加物が溶け込んでしまう。	
5.電子ビーム溶接 ④	電子ビームを収束して被溶接物を直接溶かし接合を行う方法。溶接棒を使わず真空中で加工を行うため不純物の溶け込みがない。また、入熱の密度が高いため銅のような熱伝導の高いものでも対応し易い。	大規模な真空チャンバーが必要となる。また、開先の精度が必要（0.3～0.5mm 以内）。	SKB で 50mm の無酸素銅を溶接した実績有り。
6.レーザービーム溶接	レーザーにより被溶接物を直接溶かし接合を行う方法。溶接棒を使わないため、真空中で加工を行えば不純物の溶け込みがない。	電子ビーム溶接と比べエネルギー変換効率が悪く無酸素銅の数十 mm 厚の溶接は対応不可	

(7) 加工手順の選択

(6)項までの検討において「焼きばめを用いた加工手順」と「内層・外層を別構造とした加工手順」が銅-炭素鋼複合オーバーパックの加工手順として適応し得る可能性があるとの検討結果が得られた。そこで、この両者の比較を行いいずれの手順で行うかを選択する必要がある。

ここで両加工手順を表 5.1-7 で比較する。

表 5.1-7　加工手順の比較

焼きばめを用いた加工手順	内層・外層を別構造とした加工手順
① 小型化出来る可能性がある 外層と内層を別構造とする場合、ハンドリング等の際に外層となる外容器で内側の全ての荷重を受けるため、外容器の肉厚を厚くする必要が生じる場合が有り、その結果容器が大きくなり容器の加工費や処分費用が大幅にアップする可能性がある。 ② 内容器・外容器間の隙間による陥没等の発生防止 内外層間に大きな隙間が生じるような構造の場合、将来的に陥没等の原因となる可能性があるため接合を行わなければならない。	① 量産化を図りやすい 焼きばめ加工は自動化を図ることが非常に困難で量産化を行う場合でもコストダウンが図りにくい。 ② 蓋接合部の構造の単純化 焼きばめ構造で、蓋部にクラッド材を使用する場合、蓋部を溶接する際に内層から外層側への不純物の溶け込みを避けるため、蓋及び底部と円筒部の接合箇所の形状が複雑になってしまい(図 5.1-7 参照)量産化が図りにくい。

上記の表より「内層・外層を別構造とした加工手順」における内外層間の隙間が陥没等で問題となるようなものでなければ、量産化においてコストダウンを図りやすいかを考慮し加工方法を選択すれば良いことになる。

「内層・外層を別構造とした加工手順」における内容器・外容器間の隙間については、加工方法(コスト)により大幅に変わってしまう可能性があるが、5.2 項の検討のように 2mm とした場合、廃棄体の体積に占める空隙の割合は、下記の様になる。

廃棄体有効長さ：1,845mm=1,955mm(ｵｰﾊﾞｰﾊﾟｯｸ全長)－110mm(ﾊﾝﾄﾞﾘﾝｸﾞ部長さ)

廃　棄　体　径：φ770mm

廃 棄 体 体 積：$858{,}712\mathrm{cm}^3 = \pi \times 770^2 \times 1{,}845 / (4 \times 1{,}000)$

空　隙　外　径：φ684mm

空　隙　内　径：φ680mm

空隙部長さ：　1,765mm

空隙部体積：7,559 cm^3＝π×(684^2-680^2)×1,765／(4×1,000)

空　　隙　　率：0.88％＝7,559／858,712

となり、低レベル廃棄体の最大 10%程度の空隙と比べても非常に小さくの陥没等の原因となる可能性はない。

一方、量産化時のコストを考慮した比較において下記の様な点から、「内層・外層を別構造とした加工手順」の方が有利と考えられる。

① 寸法増分は径方向、長手方向とも数十㎜程度で大幅な寸法増にはならない。
5.2 項で後述の設計検討結果(外容器肉厚:径方向 45 ㎜,底部 50 ㎜ ,一方銅の腐食代 20 ㎜)より径方向の増分 50 ㎜({45 ㎜－20 ㎜}×2),長さ方向の増分 30 ㎜。

② 寸法増に伴う材料費等のアップ分はそれほど大きくない。
上記寸法の増による重量増分は焼きばめ等の加工費のアップ相当分と比べ少ないと考えられる。

③ 焼きばめ加工は自動化を図ることが非常に困難で量産化を行う場合でもコストダウンが図りにくい。

④ 焼きばめ構造ので、蓋にクラッド材を使う場合外層蓋部継ぎ目の溶接箇所は、図 5.1-7 の様な構造としなければならず、遠隔化が図りにくい。

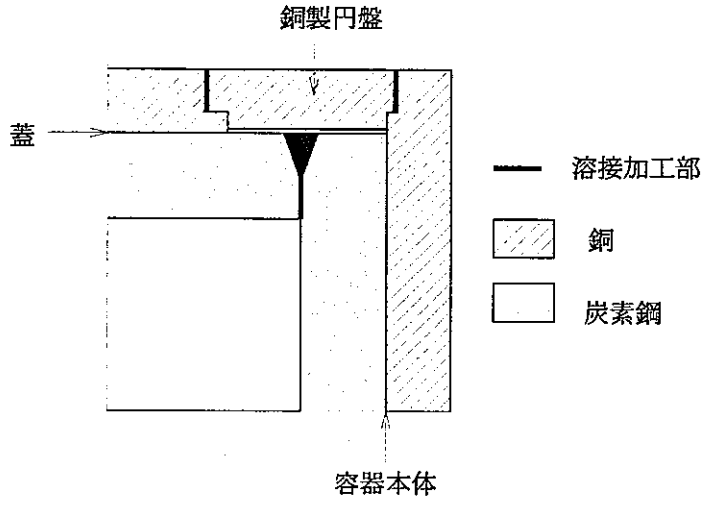


図 5.1-7　外層蓋部継ぎ目の溶接箇所概念図

⑤　内容器の蓋をボルト締めする等の構造の上でも選択肢が増える。

以上により「内層・外層を別構造とした加工手順」を選択することとする。

(8) 外容器の製作方法の選択

図 5.1-6 において外容器の製作方法として 4 通りの方法を上げた。これらの加工方法は、いずれも銅への異物の溶け込み,銅の粒成長による検査性の悪化等技術的に解決が非常に困難となるような問題はないと考えられる。しかし、実規模の容器を製作する場合は、いずれも設備・ジグ等を導入する必要がある。したがって、どの加工方法を選択するかについては、設備等の投資を含む加工に係るコストにより決める必要がある。現時点においてはこれらを定量的に評価することは困難であるため表 5.1-8 各要素の相対比較を行った。しかしこれらの評価は、容器の製作が実現化する時点での技術的成熟度、新規大型設備の有無、容器製作数量等により大幅に変わるものと考えられる。

本検討では、溶接箇所が少なく溶接部検査箇所も少ないことに着目し、押し出し加工による容器一体化加工が有望であると考え、この加工方法に基づき設計検討を行うこととした。

表 5.1－8 外容器加工方法の比較

	円筒曲げ溶接	円筒押し出し溶接	円筒鍛造溶接	押し出し一体加工
加工数	×	△	△	○
溶接箇所	×	△	△	○
検査の難易度	△*1	○	○	○
設備投資	○	△	△	△
総合評価	△	○	○	◎

*1 円筒部の検査においては下記のような点から困難が伴うものと考える。

①浸透探傷試験の場合

溶接部表面につながる欠陥のみで内部の欠陥については適応不可

②気密漏洩検査の場合

内部から外部につながる欠陥のみで内部の欠陥については適応不可

③超音波探傷試験

溶接線が円筒部に対し垂直方向であり検出が困難(図 5.1-8 参照)。

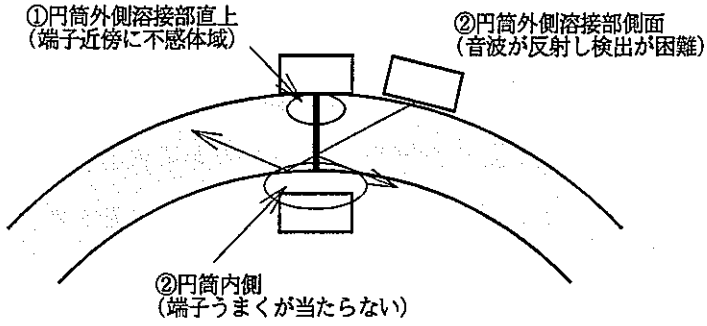


図 5.1-8 円筒部溶接箇所の超音波探傷の検出方法

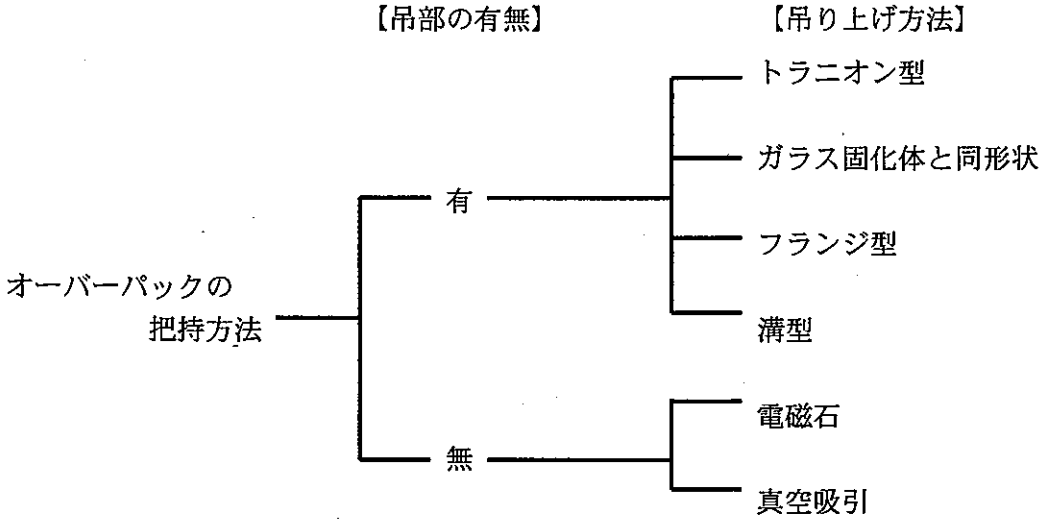
④放射線透過試験

現行国内において、鋼管の検査で測定している肉厚は最大 25mm～45mm 程度である[1]。銅は、鋼よりもX線の透過性が悪く、また健全な耐食性との観点からの欠陥に対する感度についても考慮する必要があることから、5.2 項で具体化した肉厚 43mm 厚の銅円筒の欠陥検査にこれらの検査設備が適応し得るかについては今後検討を行ってゆく必要性がある。

(9) ハンドリング機構の選定

本項においては、処分場内での取り扱い等を考慮し、オーバーパックにハンドリング機構を取り付けるものとしその機構の検討を行う。

ハンドリング機構としては、動燃殿既研究において下記の形状が検討されている。



本検討においてはこれらに加えチタン製複合オーバーパックで検討を行った着脱型及び外層円筒部を延長しハンドリング用の穴を付けた機構（図 5.1-9 参照，以下本機構をスカート方式と称する）を加えて検討を行うこととする。

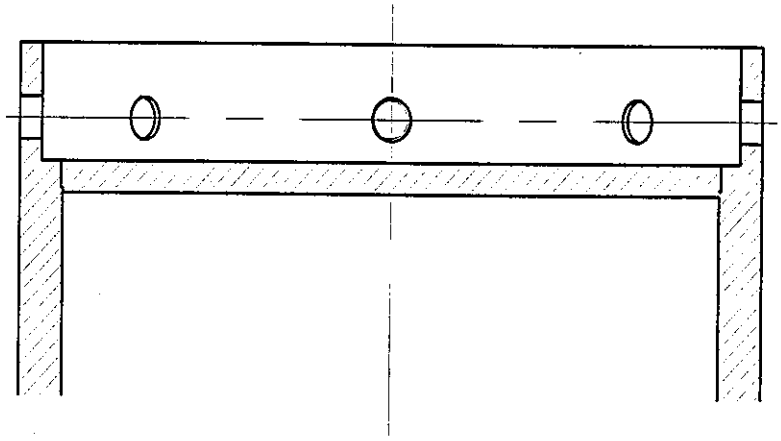


図 5.1-9 スカート方式の概念図

また、本検討の対象が「銅－炭素鋼複合オーバーパック」で、外層部である銅は磁化しないことから、電磁石方式での取り扱いは困難と考えられるため検討の対象からは除外した。

各ハンドリング機構の比較を表 5.1-9 に記す。ガラス固化体に付いたハンドリング機構は、固化体上部の一か所のみである。したがって定置時に容器をどのような姿勢にするかに係わらず、ガラス固化体にを容器に挿入する際の容器の姿勢は、縦置きとする方が好ましいと考えられる。このため、ガラス固化体挿入作業の際の取り扱いを考慮すると、縦置き姿勢時の容器下部に突起を付けることは出来ない。定置時の姿勢についてはまだ未定であることから縦置き、横置きの両姿勢における対応も考慮する必要がある。

定置時縦置き姿勢にする場合は、充填材の施工も含めて考えた場合、スカート方式が最も良い方式であると考えられる。しかし、定置時横置き姿勢にする場合は、 縦置き時の容器蓋側のみにハンドリング機構を取り付ける方式では対応出来ない。一方、円筒部にハンドリング機構を取り付ける場合は、ハンドリング機構の取り付けが困難で、定置後のベントナイトの施工性も良くない。したがって脱着方式が好ましいと

表 5.1−9　各ハンドリング機構の比較

吊部の有無		有					無	
吊り上げ方法		トラニオン型	ガラス固化体と同形状	フランジ型	溝型	スカート型	着脱型	真空吸引
構造概念		・オーバーパック本体の胴部にトラニオンを設ける →トラニオン部に吊具を固定し、吊上げる	・オーバーパック上部にガラス固化体と同形状の吊部を設ける →吊部に吊具を固定し、吊上げる	・オーバーパック上部をフランジ型にして吊部を設ける →フランジ部に下方から吊具を固定し、吊上げる	・オーバーパック胴部に溝を設ける →溝部に吊具を挟み込み、吊り上げる	・オーバーパック上部にスカートを付け吊部を設ける →スカート部の穴に吊具を固定し、吊上げる	・オーバーパック胴部に着脱可能な吊部を設ける →吊部に吊具を固定し、吊上げる	・オーバーパックに吊部は不要 →オーバーパック上部を真空吸引し、吊り上げる
ハンドリング性	吊部	・特に問題なし	・銅の場合強度不足のため銅のみで作った場合吊部が大型化してしまう(特に定置時横置き姿勢の場合)	・定置後の吊具開放機構等の検討が必要	・定置後の吊具開放機構等の検討が必要	・定置時横置き姿勢の場合の取り扱い方法の検討が必要	・定置時に支障のない形状の検討 ・定置後に吊部を外すことの可能な方式の検討	・特に問題なし
	処分孔への影響	・吊具の開放スペースが必要 → 処分孔拡大	・特に問題なし	・特に問題なし	・吊具の開放スペースが必要 → 処分孔拡大	・吊具の開放スペースが必要 → 処分孔拡大	・吊部の取り外しのスペースが必要 → 処分孔拡大	・特に問題なし
	緩衝材への影響	・トラニオン部周囲のベントナイトの施工が困難	・吊部の緩衝材の施工が困難	・吊具取り外し用のスペースへの緩衝材の施工が困難	・溝部及び吊具取り外し用のスペースへの緩衝材の施工が困難	・吊具周辺の緩衝材施工方法の工夫が必要	・吊部取り外しのスペース周辺の緩衝材の施工が困難	・特に問題なし
安全性(停電時の対応)		・特になし → 機械的構造を採用(フェルセイフ機能の確保)	・特になし → 機械的構造を採用(フェルセイフ機能の確保)	・特になし → 機械的構造を採用(フェルセイフ機能の確保)	・特になし → 機械的構造を採用(フェルセイフ機能の確保)	・特になし → 機械的構造を採用(フェルセイフ機能の確保)	・特になし → 機械的構造を採用(フェルセイフ機能の確保)	・電源喪失時でもO/P を落下させない措置が必要
製作性		・トラニオンの取付けは困難	・銅単体での施工であれば比較的容易(吊部は大型化) ・他の材料で補強を行う場合は施工が困難	・製作は容易	・製作は容易 ・容器の径または長さは大きくなってしまう	・製作は容易	・製作は容易 ・着脱機構の検討要	・製作は容易

思われるが、動燃殿既研究における脱着方式については、横置き姿勢における容器下部において容器よりハンドリング治具の方が出ているため容器の定置及び治具の取り外しが著しく困難である。また、ハンドリング機構が円筒部横側に付いているため、ベントナイトの施工性も必ずしも良くない(図5.1-10既研究における脱着方式概念図)。

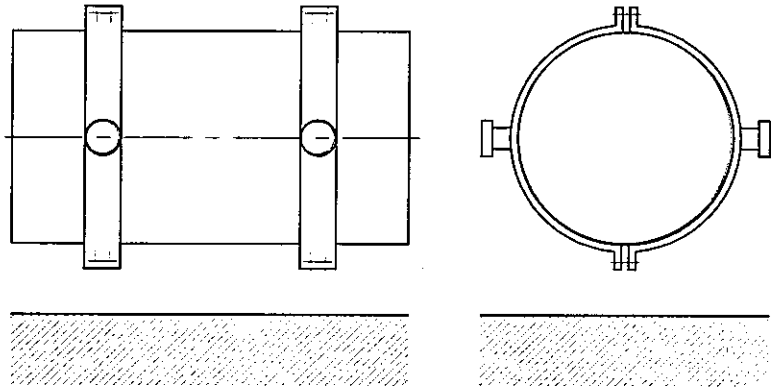


図 5.1-10 既研究における脱着方式概念図

そこで、横置き姿勢時においてもベントナイトの施工性の良いと思われるスカート方式をベースに底部に図 5.1-11 のような脱着治具を取り付け取り扱うこととする。なお、容器蓋側については容器製造及びガラス固化体挿入時等の取り扱い性を考慮し、容器直付けとする。

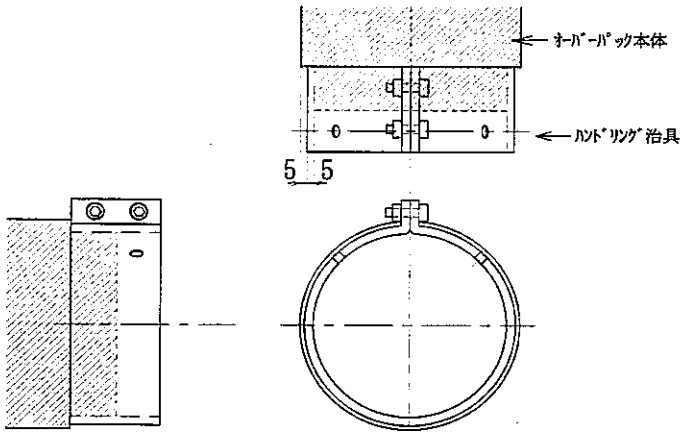


図 5.1-11 脱着式ハンドリング治具概念図

本方式であれば、容器の着脱及びベントナイトの施工は比較的容易に行えるものと考えられる。縦置き姿勢時の埋設手順(例)を図 5.1-12 に、横置き姿勢時の埋設手順(例)を図 5.1-13 に示す。

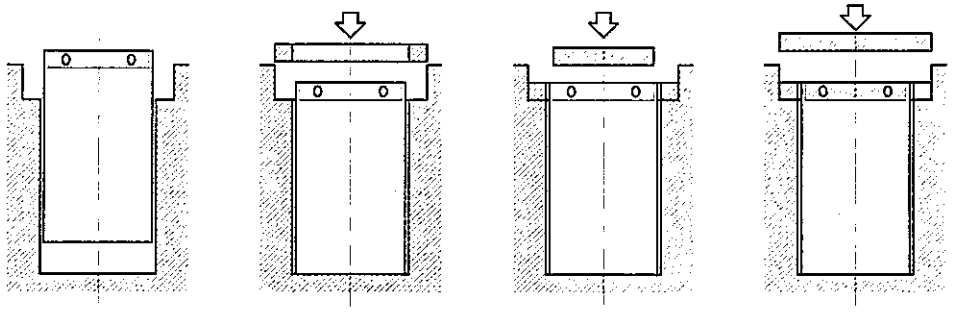
これらのハンドリング治具における今後の検討課題としては、

① 横置き姿勢に於けるハンドリング治具の着脱性/隙間へのベントナイトの施工性等から治具取付部の容器本体段差の見直し

② 治具の抜け防止として容器に溝の施工等の検討

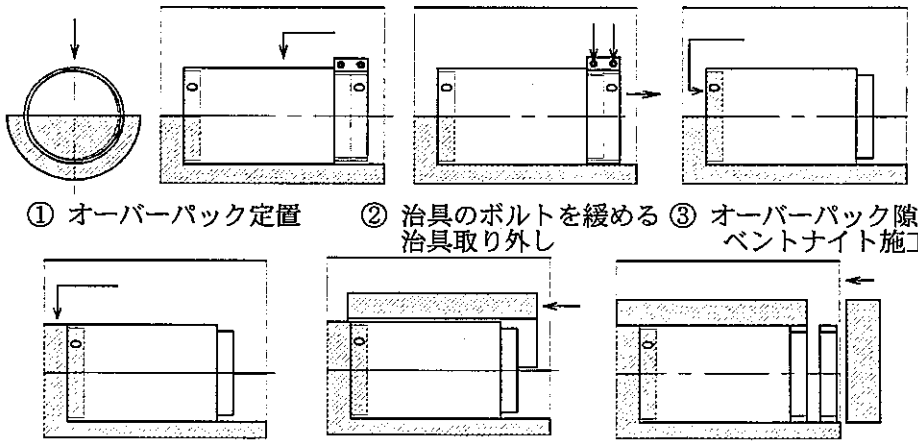
等が上げられる。

但し、ハンドリング手順については、処分坑道内で容器を取り扱う機器が適切な大きさとなり得るか等との関連から総合的に判断を行う必要があるが、処分坑道の大きさ、機器等についてはまだ具体化されていない。そのため、ハンドリング機構及び手順については容器への施工性だけでなく処分坑道の大きさ、機器等の検討を加えながら決定を行う必要があり、今後の課題と考えられる。



① オーバーパック定置　② オーバーパックスカート部外周ベントナイト施工　③ オーバーパックスカート部内周ベントナイト施工　④ オーバーパック上部ベントナイト施工

図5.1-12 縦置き姿勢時の埋設手順(例)



① オーバーパック定置　② 治具のボルトを緩める 治具取り外し　③ オーバーパック隙間ベントナイト施工

④ オーバーパック奥側ベントナイト施工　⑤ オーバーパック上半部ベントナイト施工　⑥ オーバーパック上半部ベントナイト施工

図5.1-13 横置き姿勢時の埋設手順(例)

5.1.3　内容器の構造検討

内容器の構造を検討するに当たり本体と蓋の接合方法についてどの様な方式とするかを検討し構造を決定する。

本体と蓋の接合方法については、溶接とボルト止めの二つの方式が考えられる。この両方式の比較を表 5.1-10 にまとめる。

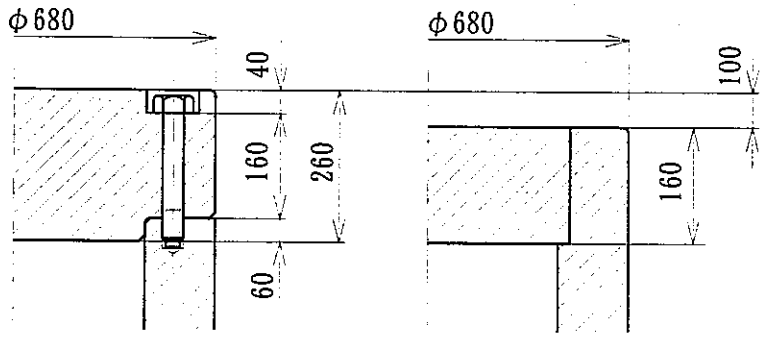
表 5.1-10　本体と蓋の接合方法による比較

溶接によるメリット	ボルト止めによるメリット
① 小型化出来る可能性がある ボルト止め構造とすることによりボルトの施工のために内層に余分な肉圧が必要な場合は溶接の方が好ましい。	① 自動化が容易 ボルト止めの方が自動化を図り易く設備のコストダウンが図り易い。 ② ガラス固化体挿入後ハンドリング手順少 内層容器を溶接する場合、溶接後の検査を行うためガラス固化体挿入後に内層を外層に入れる手順が増えてしまう(図 5.1-15 参照)。

5.2 項で後述する通りボルト止めを行うことによる寸法増はほとんどなく、溶接によるメリットは出ない。従って、内容器は、ボルト止め構造とする。

ボルト止め構造による寸法増は図 5.1－14 の通り(径方向増加なし、長さ方向約 100mm) 。

図 5.1－15 に内容器を溶接構造とした場合とボルト止め構造とした場合の加工手順例フロー図を示す。



ボルト締め構造　　溶 接 構 造

図5.1-14 内容器の構造による寸法差

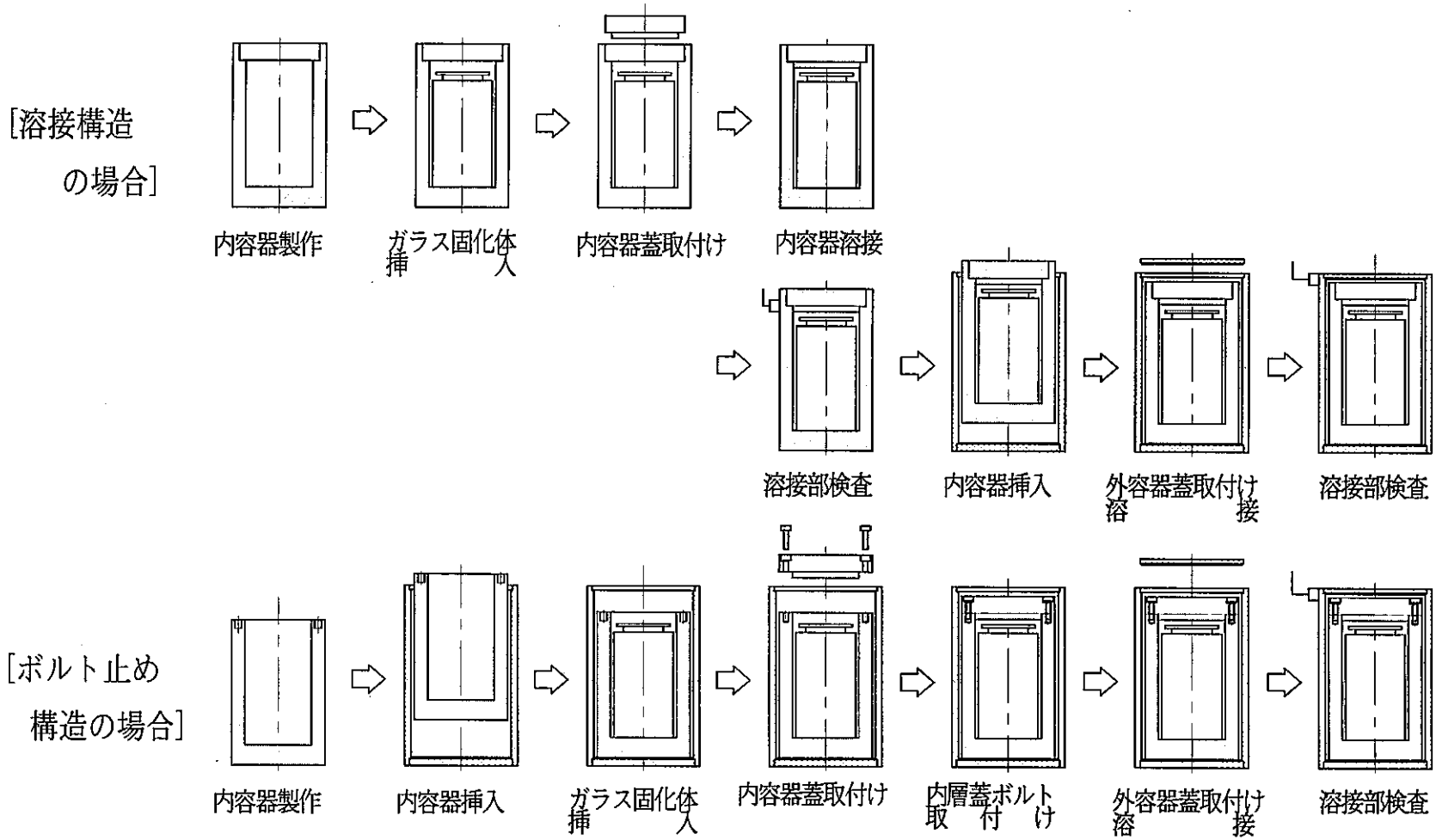


図 5.1－15　内容器を溶接構造とした場合とボルト止め構造とした場合の加工手順例フロー図

5.2 詳細設計

本節では、前節 5.1 の検討結果に基づき、図 5.1－15 をベースとしたオーバーパックの形状と寸法の設定を行う。

5.2.1 オーバーパック（最終製品全体）の形状と材質

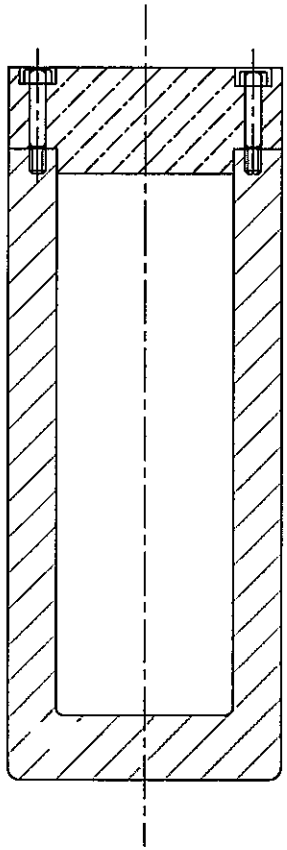
本研究では既述のように、過去に実施された耐食層を炭素鋼製オーバーパック本体に爆着したり焼きバメで密着させるというような方法はとらず、耐食層は無酸素銅で作る独立した外容器とする。一方、従来の炭素鋼製オーバーパック本体は内容器とし、この内容器を予め上記外容器に挿入しておく。遠隔操作でガラス固化体を内容器に収納した後、遠隔操作により炭素鋼製の蓋を被せボルトで内容器と固定する。そして、銅製の蓋を被せ真空雰囲気内でこの蓋と外容器を電子ビームにより（銅－銅）溶接し、外容器を密封境界とする。この方式は、最近発表された SKB の使用済燃料を処分するときの Canister の概念と類似している。(2.1 項参照)

以下に、先ず内容器の形状と材質ならびに外容器の形状を明らかにし、これらに基づき次々項の 5.2.3 で各部の寸法を算出・設定する。

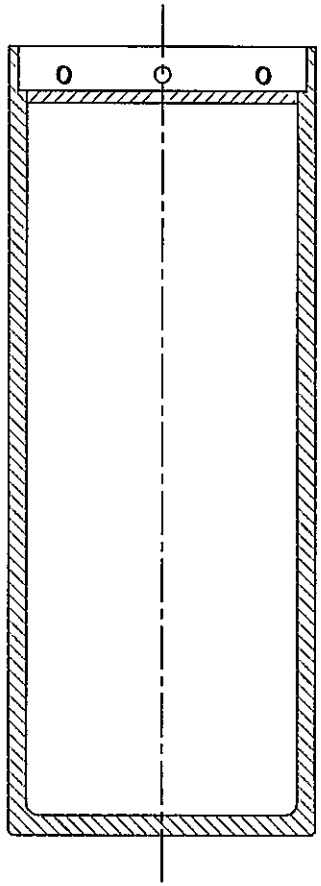
(1) 内容器（炭素鋼製容器）の形状と材質

内容器は地下 1,000m の深さの地圧および側圧に十分耐える構造強度が必要である。したがって、容器の蓋、胴および底の肉厚はいずれも厚くなるのでこれの製造に当たっては巣の出易い鋳造による製作は避け、且つ、溶接個所を極力減らすことが重要である。これに対応するには、胴と底とが一体型の構造をしたものになる。そこで本研究では、内容器は鍛造によって底と胴体とを一体型に成形し機械加工により所定の寸法に仕上げることとした。また、蓋は、内容器が密封性の機能を必要としないためボルトによって内容器と固定することとしガスケットは使用しない。ボルトの締付けは、遠隔操作によりガラス固化体を内容器に収納した後、ボルト自動締付機によって施工する。内容器の形状を外容器図と共に図 5.2－1 に示す。

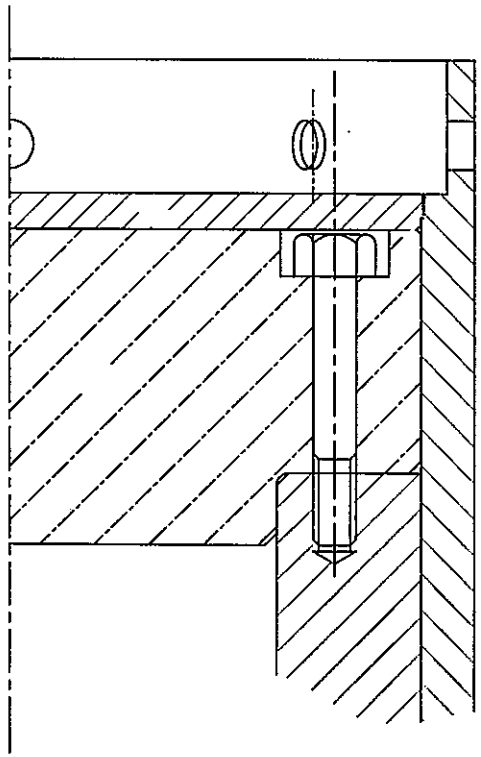
材質に関しては、耐熱性、耐食性、耐放射線性、製作性(既存技術または将来実現可能技術での製作が容易で成形･加工性に優れていいること)等を有すると同時にコストが出来るだけかからないことが重要である。更に、品質管理上、材料の組織が安定しており均質な粒度分布が得られ易いことが必要である。したがって、加工の面から



内容器(炭素鋼製容器)



外容器(銅製容器)



組立て部分拡大図

図 5.2−1 内容器及び外容器

材質としては鍛鋼品を選定する。さらに、前章4の検討結果を踏まえ MITI 告示 501 号第1種容器として別表第1に規定されている材料を選択し、内容器の材質は圧力容器用炭素鋼鍛鋼品 SFVC2B とする。この材質は前章 4 で検討した第2種及び第4種容器にも別表第1で使用が認められている。なお、圧力容器用炭素鋼鍛鋼品の JIS 規格ではこの他に SFVC1 および SFVC2A があるが MITI 告示 501 号別表第1には規定されていない。

（内容器の寸法の算出・設定は外容器とは異なり、MITI 告示 501 号第1種容器に準拠して行うため、5.2.3 に示すように外容器とは別な扱いをしている。）

(2) 外容器（銅製容器）の形状と寸法

外容器は、5.1 で述べたように押出し工法によって底と胴体を一体に成形加工した後、所定の寸法公差に仕上がるよう機械加工する。そして、この中に炭素鋼製容器を挿入し、ガラス固化体を遠隔操作で収納した後、炭素鋼製蓋を被せてボルトで固定する。次に、銅製の蓋を被せ、この蓋と銅製外容器胴体とを電子ビーム溶接により接合して一体化し密封構造とする。このように外容器は単体として加工されるため、加工のプロセス、すなわち、ハンドリングや機械加工、電子ビーム溶接等の過程で必要とする肉厚を確保すると同時に、オーバーパック組立て品としてハンドリングする場合に必要な肉厚、つまり、ガラス固化体を収納した炭素鋼製容器（蓋付き）が外容器に挿入された状態でこの外容器を吊り上げた場合、外容器の吊り上げ部や底および胴が変形や破損を引き起こすことがないような肉厚を確保しなければならない。したがって、腐食代として必要な肉厚 12 mm[2]よりもかなり厚くなることが予想される。また、前節の図 5.1－9 に示すような吊り上げるための特殊な形状（スカート状）を具備しなければならない。

予備的計算の結果、上記外容器吊り上げ部の肉厚は 23 mm 必要となる。（図 5.2－9 参照）また、遠隔操作により銅の蓋を外容器と電子ビーム溶接するには、ビームの特性上、溶接個所から一定の範囲には障害物があってはならない。すなわち、加速された電子ビームを電磁レンズで収束させ母材に照射する過程において必要となる空間を確保する必要があり、さらにビームの突き抜けを防止するためのフラット部も必要となる。したがって、胴の厚みはこれらを考慮して決定しなければならない。（図 5.2－9 参照）また、底の厚みも予備的計算から 50 mm となる。これらの値の強度的妥

当性については後述する応力評価によって示す。参考までに、電子ビーム溶接後の検査に用いる超音波探傷用の探触子の当てる方向を図 5.1－15 に示した。

なお、予備的計算は MITI 告示 501 号に制約されないので単独にできるため先に実施したが、計算の仕方は後述する応力評価の逆の手順で肉厚を求めており内容的には同じなので、ここでは計算過程の記述を省略する。また、オーバーパックにかかる外圧は炭素鋼製の内容器で受けるものとし、外容器が耐圧強度に寄与する効果は安全側に無視する。

外容器の形状を内容器と共に図 5.2－1 に示す。

(3) 外容器（銅製容器）と内容器（炭素鋼製容器）とのクリアランス

銅容器とオーバーパックとの片側クリアランスは、両者の外径の寸法公差、鉛直度、仕上がり精度等に左右されるが、ここでは最近発表された SKB の使用済燃料を処分するための Canister（2.1 項参照）で用いられているクリアランス（片側 2 mm＝(φ950－φ946)/2）を適用する。

なお、参考までに、使用済み燃料輸送キャスクとバスケットとの片側クリアランスがどのように設定されているかを以下に示す。

① PWR 用キャスク： TN12A

キャスク内径 1,220 mm、バスケット外径 1,218 mm

隙間 2 mm、片側クリアランス 1 mm

② BWR 用キャスク： NFT-12B

キャスク内径 786 mm、バスケット外径 782 mm

隙間 4 mm、片側クリアランス 2 mm

5.2.2 内容器（炭素鋼製容器）肉厚計算の前提条件

内容器の肉厚計算に当たり、前提条件を次のように設定する。

(1) ガラス固化体の仕様

① 大きさ： φ430×1340H

② 150℃における熱膨張： 径方向 0.91 mm (PNC ZJ1216 97-008 より)

軸方向 2.82 mm (同 上)

(2) 処分地の条件

① 岩盤の湿潤密度 2.65 g/cm^3

② 側圧係数 1.32

③ 処分深度 1,000 m

(3) 内容器の材質

SFVC2B (JIS G 3202 圧力容器用鋼炭素鋼鍛品)

(4) オーバーパック耐食層（以下、外容器）の材質

無酸素銅 (外圧に対する強度は考えない)

(5) 内容器（炭素鋼製容器）の内寸

上記(1)よりガラス固化体の熱膨張値を考慮しφ440×1345 とする。

(6) 外圧（地圧）の設定

上記(2)より鉛直方向の圧力は、 26.0 MPa

水平方向の圧力は、 34.3 MPa

5.2.3 内容器（炭素鋼製容器）の肉厚算出

最大外圧は水平方向の 34.3 MPa を用い、これを内容器が受けるものとし、外容器（銅製容器）の強度寄与は安全側に無視する。

(1) 内容器（炭素鋼製容器）胴肉厚の算出

MITI 告示 501 号第 13 条第 2 項第 1 号イ（ロ）に示す Pa の式より t を求める。（ここで求めた t の式は、結果的に第 2 種容器～第 4 種容器で示されている t の式と同じになる。）

$$\mathrm{Pa} = \left(\frac{2.167t}{Do} - 0.0833\right)B \quad \text{より} \quad \mathrm{t} = \frac{Do\left(\frac{Pa}{B} + 0.0833\right)}{2.167} \quad \cdots\cdots (1)$$

または

$$Pa = \frac{2St}{Do}(1-\frac{t}{Do}) \qquad より \qquad t = \frac{Do}{2}(1-\sqrt{1-\frac{2Pa}{S}}) \quad \cdots\cdots (2)$$

のうち、tの大きい方を選ぶ。ここにS＝0.9×別表9を選ぶ。(1.5×別表2より小さい)

(1)式において Do＝440+2t を代入すると

$$t = \frac{440+2t}{2.167}(\frac{Pa}{B}+0.0833) \quad \cdots\cdots (3)$$

ここにPa＝34.3, Bはt, Do, ℓ から求まる係数である。

使用材料は前述のようにSFVC2B (JIS G 3202 圧力容器用炭素鋼鍛鋼品)であるから MITI 告示 501 号別表第9より 150℃における設計降伏点は 220 N/mm² となる。

一方、ℓ/Do = 2.56 , Do/t = 5.67 (但し、ℓ=1505, t=120と仮定)であるからMITI告示501号別図第5よりA≒0.04となり、別図第7よりB≒120となる。

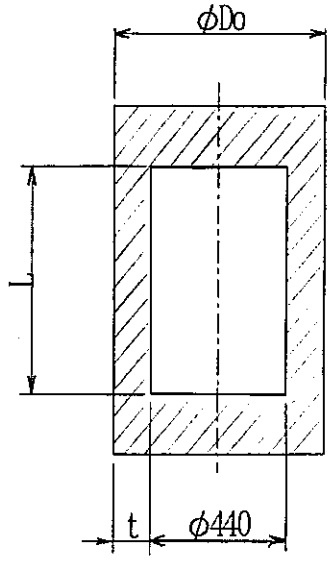


図 5.2－2 肉厚計算モデル

したがって(3)式は

$$t = \frac{440+2t}{2.167}(\frac{34.3}{120}+0.0833) \qquad \therefore t = 113.6\,\mathrm{mm}$$ ラウンドアップして120とする。

(2)式からは $t = \frac{440+2t}{2}(1-\sqrt{1-\frac{2\times 34.3}{0.9\times 220}}$ より t＝ 52.1 を得るが前出のt＝113.6 mmより小さいのでこの値は採用しない。

なお、参考までに、ℓ =1345(内容器内高)のとき、 A = 0.055, B≒ 120

ℓ =1765(蓋込み内容器全高)のとき、A = 0.048, B≒ 120

となり、いずれのケースも同じになる。

MITI 告示 501 号第 13 条第2項第1号の指定により別図第5を見ると、ℓは第 32 条第1項第3号の備考に規定されているが、本設計の場合に当てはまる定義がはっきりしないので、前記のように該当すると思われるℓの値を3種類変えてBを求めて見たが、いずれも120となって上記程度のℓの相違による影響はない。

(2) 内容器（炭素鋼製容器）底板の厚み算出

第1種容器には平板の式がないので（第1種容器では平板ではなく鏡または球形）第2種容器

に規定されている平板の式（第24条）を用いる。(第2種～第4種容器の平板は同じ式)

$$t = d\sqrt{\frac{KP}{S}}$$

ここに d：内径 440 mm 、 P： 34.3 Mpa = 34.3 N/mm²

K： 0.5 (第24条 (ℓ)より)

S： 132 N/mm² (別表第4より)

$$\therefore \quad t = 440\sqrt{\frac{0.5 \times 34.3}{132}} = 158.6$$

よって 160 mm とする。

(3) 内容器（炭素鋼製容器）の蓋の厚さ算出

$t = d\sqrt{\frac{KP}{S}}$ において d = 440 とすると前項と同様に t = 158.6 ⇒ 160 となる。

一方、d をボルトのピッチサークルダイアとすると(第24条(a)),

$$t = 536\sqrt{\frac{0.5 \times 34.3}{132}} = 193.2$$

となる。

したがって、ボルト座ぐり下面より蓋底面までの厚さが 160 mm 、座ぐり部を除く蓋の厚さが 193.2 mm 以上とする。(設計の結果、200 mm となった。)

(4) 内容器蓋インロー部の強度評価

内容器蓋はインロー部がオーバーパック内面に浅く入り込んでいるので上蓋が外圧によって水平に移動した場合、内容器トバクチ（A 部）に対しせん断が作用する。又、蓋のインロー部にもせん断力が作用する。

水平外力 $= 34.3\text{N/mm}^2 \times 200 \times 680$

$= 4.665 \times 10^6$ N

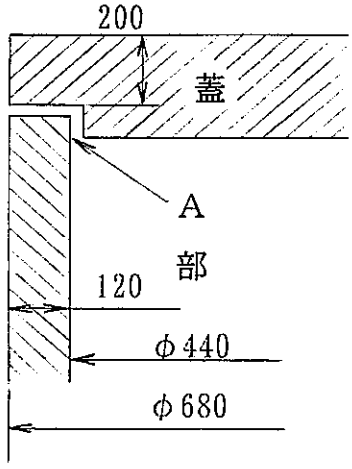


図 5.2－3　インロー部強度評価モデル

(イ) 側圧による胴部 A 面の剪断応力評価

先ず、A 部の面積 S を求める。

$$S = \frac{\pi}{4}\left(680^2 - 440^2\right) \times \frac{1}{2}$$

$$=1.06\times10^5\ \mathrm{mm}^2$$

したがって、A部の剪断応力τは

$$\tau=\frac{4.665\times10^6}{1.06\times10^5}$$

$$=44.43\ \mathrm{N/mm^2}$$ となる。

一方、SFVC2Bの許容剪断応力はMITI告示501号13条第1項第1号チより　$\tau_a=0.6\times147^*=88.2\mathrm{N/mm^2}$　であるから　$\tau_a>\tau$　となる。

したがって、A部が剪断で降伏することはない。

＊ MITI告示501号別表第2　at 150℃

(ロ) 側圧による胴部B面の剪断応力評価

B部の面積 S:

$$S=\frac{\pi}{4}\times440^2\times\frac{1}{2}$$

$$=7.6\times10^4\ \mathrm{mm}^2$$

B部の剪断応力　τ:

$$\tau=\frac{4.665\times10^6}{7.6\times10^4}$$

$$=61.38\ \mathrm{N/mm^2}$$

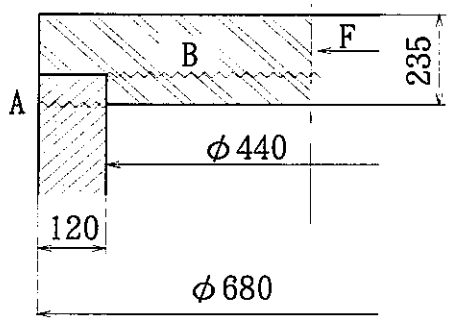


図5.2－4外容器上部模式図

一方、SFVC2Bの許容剪断応力は（イ）と同様に

$\tau_a=0.6\times147=88.2\mathrm{N/mm^2}$であるから　$\tau_a>\tau$　となる。

したがって、B部が剪断で降伏することはない。

(ハ) インロー部圧縮応力評価

受圧面積 C:

$$C=\pi\times440\times50$$

$$=6.91\times10^4\mathrm{mm}^2$$

圧縮応力　σ:

$$\sigma=\frac{4.665\times10^6}{6.91\times10^4}$$

$$=67.51\ \mathrm{N/mm^2}$$

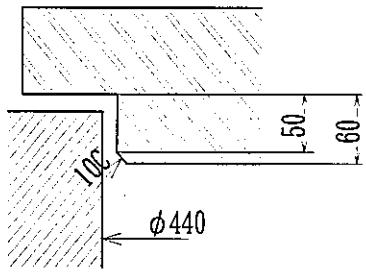


図5.2－5　インロー部模式図

SFVC2B の設計降伏応力は MITI 告示 501 号別表 9 より

$\sigma_y = 220\ N/mm^2$ であるから　$\sigma_y > \sigma$ となる。

したがって、インロー部が圧縮で降伏することはない。

(5) ボルトの太さと本数

オーバーパックの上蓋は閉止フランジと見なせるので、この規模に相当する JIS 閉止フランジからボルトの太さと本数を求める。

構造的には蓋インロー部により水平外力を受けるため、ボルトには直接外力が働くことはない。又、垂直外力に対しても構造上、ボルトには力が働かない。

JIS B 2220 より 30K閉止フランジ（外径φ630）の場合、ボルトは M36×3 で本数は 16 本となっているのでこれを採用する。参考までにインロー部がないとした場合の計算を行う。

$$\tau = \frac{4.665 \times 10^6}{\frac{\pi}{4} \times (32.752)^2 \times 16}$$

ねじ有効径＝φ32.752 であるから、1 本当たりの剪断応力 τ は、

$= 347.17\ N/mm^2$

上記の値を考慮し、ボルト材質を Ni-Cr 合金鋼(高張力鋼 : JIS G 4108)の SNB24-1 を用いることとする。

MITI 告示 501 号別表第 3 より SNB24-1 の許容引張応力は、

$\sigma_{ymin} = 1{,}030\ N/mm^2$

また一般的に、$\tau = 0.6 \times \sigma$ の関係で求められるため、

許容剪断応力 $\tau a = 0.6 \times 1{,}030 = 618\ N/mm^2$ であるから　$\tau_a > \tau$ となる。

したがって、インロー部がなくてもボルトが剪断で破壊することはない。

以上の計算式と計算結果を表 5.2－1 に示す。

表 5.2－1 内容器（炭素鋼製容器）強度計算式及び計算結果

	算出根拠	計算式	計算結果
内容器胴部	通商産業省告示 501 号（発電用原子力設備に関する構造等の技術基準、以下 MITI 告示 501 号）第1種容器 Pa の式より t を求める。（ここで求めた t の式は、結果的に第 2 種容器～第 4 種容器で示されている t の式と同じになる。）	次の 2 式のうち t の大きい方を選ぶ。 $t = \frac{D_o(\frac{P_a}{B} + 0.0833)}{2.16}$ $t = \frac{D_o}{2}(1 - \sqrt{1 - \frac{2P_a}{S}})$ ここに Do は胴外径、Pa は外圧、 S は1.5×別表2又は0.9×別表9の小さい値、 B は別図 5 ～24 から求める値	t = 113.6 mm これを丸めて t =120.0 mm とする。
内容器底板	MITI 告示 501 号第2種容器で示されている平板の式から t を求める。 （第 1 種容器には平板の式がないため）	$t = d\sqrt{\frac{KP}{S}}$ ここに、 d は内径 K は平板の取付け方法による係数 P は最高使用圧力 S は別表 4 に規定する許容引張応力	t=158.6mm これを丸めて t =160.0 mm とする。
内容器蓋	同　上	同　上 一方、d を内径φ440 の代わりにピッチサークルダイヤφ536 として厳しく評価すると、 t = 193.2 mm となる。 設計の結果、蓋の厚みはインロー部（60 mm）を除いて 200 mm となった。（インロー部を含むと 260 mm）	同　上
蓋インロー部	通常の構造解析用の一般式を用い、許容せん断応力は MITI 告示 501 号による。	$\tau = \frac{F}{A} < \tau_a$ ここに F：インロー部に作用する水平外力 A：せん断を受けるインロー部の面積 τ_a：MITI 告示 501 号より 0.6×別表第 2	胴及び蓋共、 τ_a＝88.2N/mm² を超えない。
ボルトの強度	通常の構造解析用の一般式を用い許容せん断応力 τ_a は MITI 告示 501 号ボルト材の最小降伏点×0.6 とする。	蓋の構造上、ボルトには引張り応力もせん断応力も働かないが、インロー部がないとした場合のボルトに作用するせん断応力を求め、これが τ_a 以下であることを確認する。式は同上。ただし、A はボルトの谷の面積。	ボルト 1 本当りのせん断応力は最小降伏点×0.6 を超えない。

5.2.4 外容器（銅製容器）の肉厚算出

(1) 銅容器底の応力評価

銅の許容曲げ応力の計算は使用条件 150℃で行う。降伏応力はσ_y=50 N/mm^{2}を用いる。[3]

したがって許容剪断応力は、

$$\tau_a = 0.6 \times \sigma_y = 30\ \mathrm{N/mm^2}$$

となる。

廃棄体全荷重 6,000 kg f が、底板にかかると仮定すると、底板の付け根に働く剪断力τは、

$$\tau = \frac{6{,}000 \times 9.8066}{\pi \times 684 \times 50}$$

$$= 0.55\mathrm{N/mm^2} < \tau_a$$

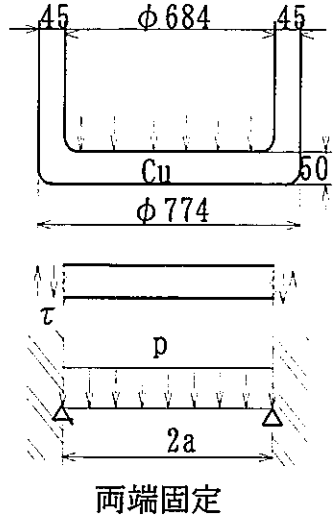


図 5.2－6 銅容器底の応力評価

曲げ応力σ_bは、

$$\sigma_{b\max} = 0.75\frac{pa^2}{h^2}$$

$$= 0.75 \times \frac{\dfrac{(6{,}000 - 1648.4) \times 9.8066}{\frac{1}{4}\pi \times (684)^2} \times (342)^2}{50^2}$$

$$= 4.08\mathrm{N/mm^2} < \sigma_y$$

以上の結果より、最も厳しい条件である両端単純支持で廃棄体の全重量を受ける場合でも銅の底が降伏することはない。

(2) 吊上げ部（スカート）の引張り応力評価

吊上げ部（スカート）にかかる引張り応力は、

$$\sigma = \frac{6{,}000 \times 9.8066}{\frac{\pi}{4} \times (774^2 - 728^2) - 4 \times (40 \times 23)}$$

$$= 1.16\mathrm{N/mm^2} < \sigma_y$$

したがって、銅の吊上げ部（スカート）が引張り応力で降伏することはない。

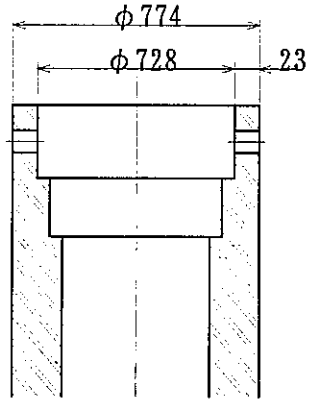


図 5.2－7 吊上げ部模式図

(3) 吊上げ部（スカート）の穴の応力評価

吊り穴にかかる剪断応力を下記により求める。

吊り用の穴 4 個で取り扱うので、

$$\tau = \frac{6{,}000 \times 9.8066}{4 \times 50 \times 23}$$

$$= 12.8\mathrm{N/mm^2} < \tau_a$$

従って、銅製吊上げ部（スカート）の穴は

剪断で降伏することはない。

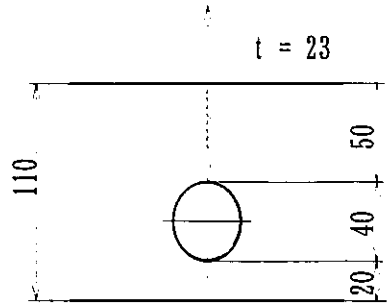


図 5.2－ 8 吊上げ部の穴の模式図

以上の計算結果を踏まえて設計したオーバーパックの詳細図を図 5.2－ 9 に示す。また、前項 5.1 で検討した結果を考慮した製作･組立て・検査手順の概念を図 5.2－10 に示す。

蓋ボルト締め_外周無酸素銅押出し容器式オーバーパック

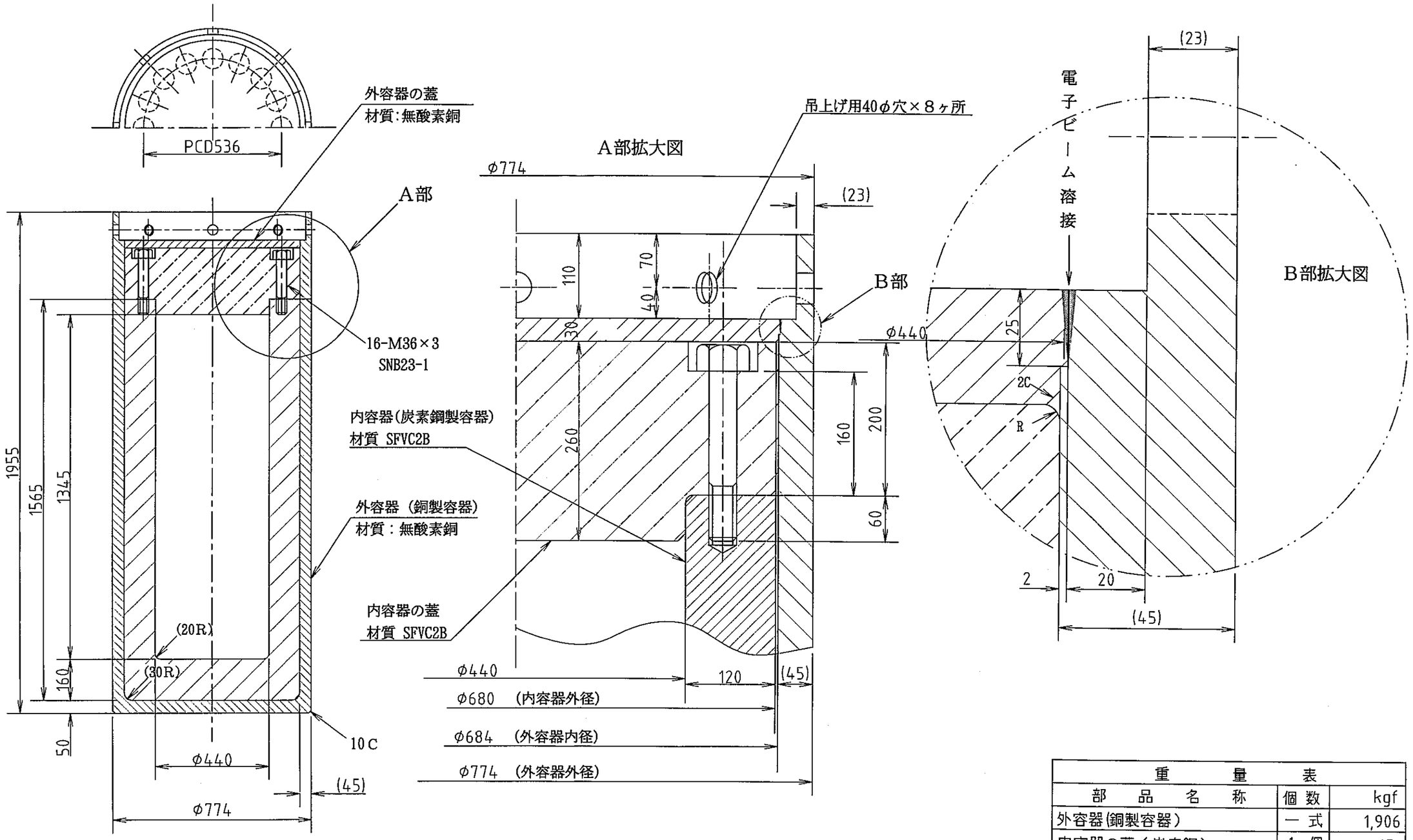


図 5.2−9 オーバーパックの詳細図

(鉛直外圧26.0MPa, 水平外圧34.3MPaのリファレンスケース)

重　量　表		
部　品　名　称	個 数	kgf
外容器(銅製容器)	一 式	1,906
内容器の蓋（炭素鋼）	1 個	671
内容器（炭素鋼製容器:蓋除く）	一 式	2,689
小計（オーバーパック合計）	一 式	5,266
ガラス固化体	一 式	約 500
総合計(廃棄体全重量)	一 式	約5,800

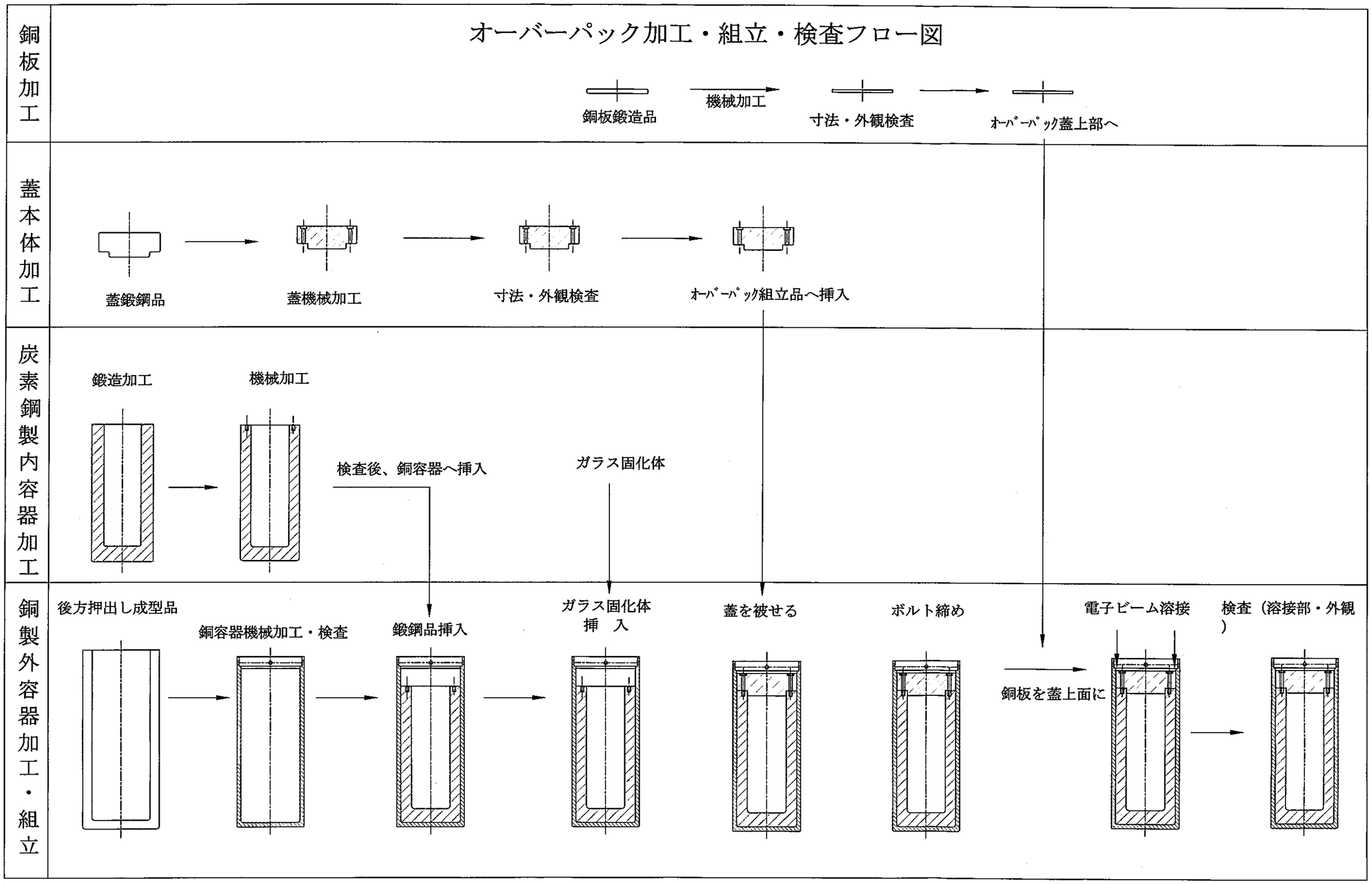


図5.2－10 オーバーパック加工・組立・検査フロー図

5.2.5 オーバーパックに生じる応力解析

オーバーパックの健全性を確認するため、縦置き定置の場合と横置き定置の場合についてそれぞれ構造強度解析を実施する。

(1) 縦置きの場合

(a) 解析条件

① 計算コード： NASTRAN

② 解析モデル： 図 5.2－11 に示すように軸対称（90°）1/4 ソリッドモデルとする。

③ SFVC2B 物性値：ヤング率 1.95×10^5 N/mm^2（MITI 告示 501 号別表第 11)、(C： 0.3%以下) ポアソン比 0.3

設計応力強さ 147 N/mm^2 at 150℃（MITI 告示 501 別表第 2）

④ 外圧荷重： 垂直荷重 26.0 Mpa、 水平荷重 34.3 MPa

(b) 解析結果

解析結果を図 5.2－12 に示す。どの要素も設計応力強さを下回っていることが示されている。なお、変形を同時に表示しているが、見やすくするため実際の変形量の 5 倍で拡大誇張表示し変形の概念が把握しやすいよう表現している。

(c) 応力評価

応力評価は MITI 告示 501 号第 13 条に基づいて行う。すなわち、

① 一次一般膜応力強さ P_m については $P_m \leqq S_m$

ここに S_m は設計応力強さで MITI 告示 501 号別表第 2 より 147 N/mm^2 (at 150℃)

② 一次局部膜応力強さ P_ℓ については $P_\ell \leqq 1.5\ S_m$

③ 一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さ（P_m+P_ℓ）については

$(P_m+P_\ell) \leqq 1.5\ S_m$ とする。

解析の結果が示すように、どの要素の膜応力も 1.1 S_m 未満であるため MITI 告示 501 号で定義されている局部膜応力は発生していない。したがって、上記②は本ケースの場合、該当しない。評価位置は解析モデル図に示すように底と胴体の付け根付近（A－A'断面)、中央よりやや下方の位置で応力が最大となっている付近（B－B'断面)、中央付近（C－C'断面）及びこれらと対称形となっている中央よりやや上方の位置で応力が最大となっている付近（D－D'断面)、及び蓋と胴体の付け根付近（E－E'断面）の 5 個所とする。応力評価結果を表 5.2－2 に示す。

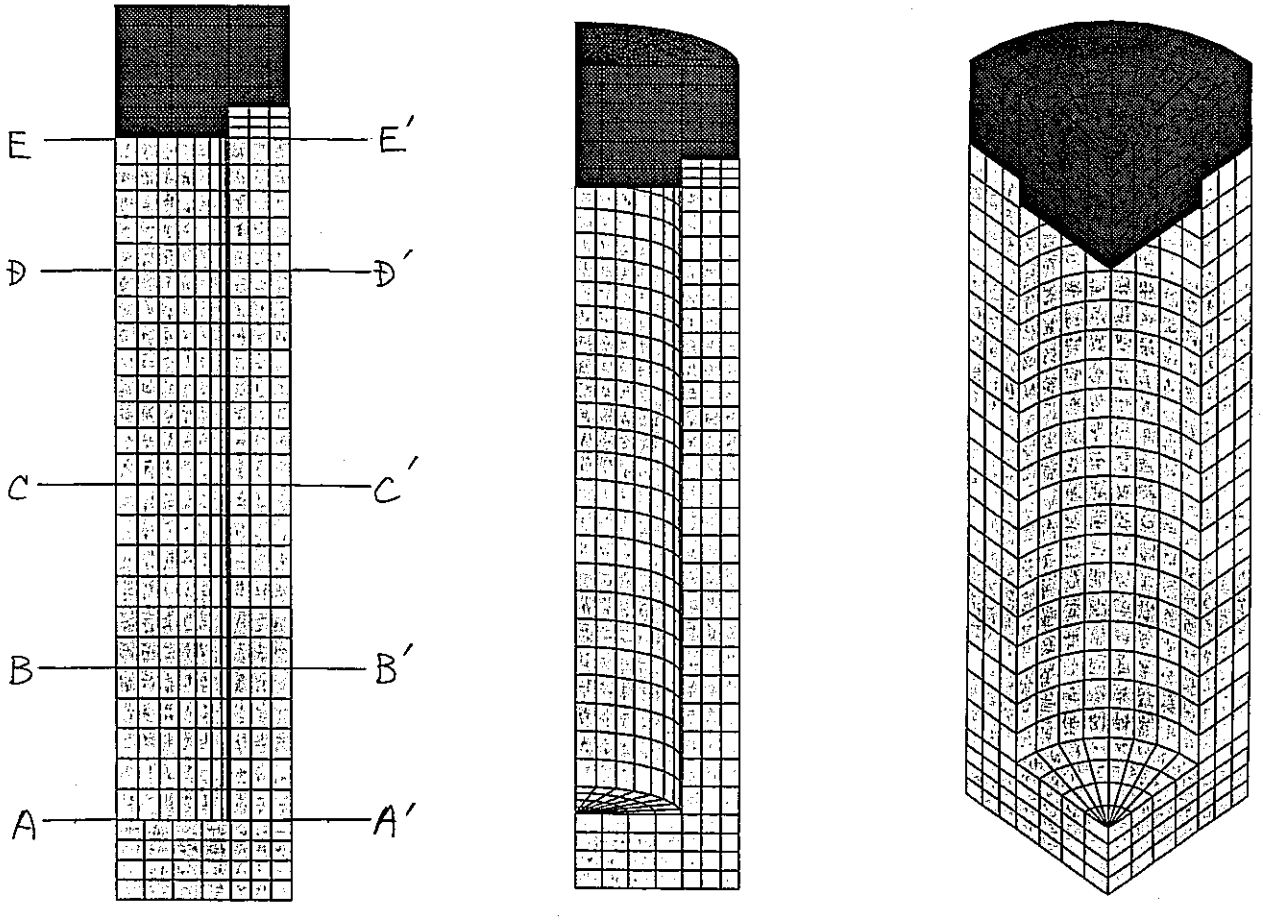


図 5.2－11　縦置き解析モデル図

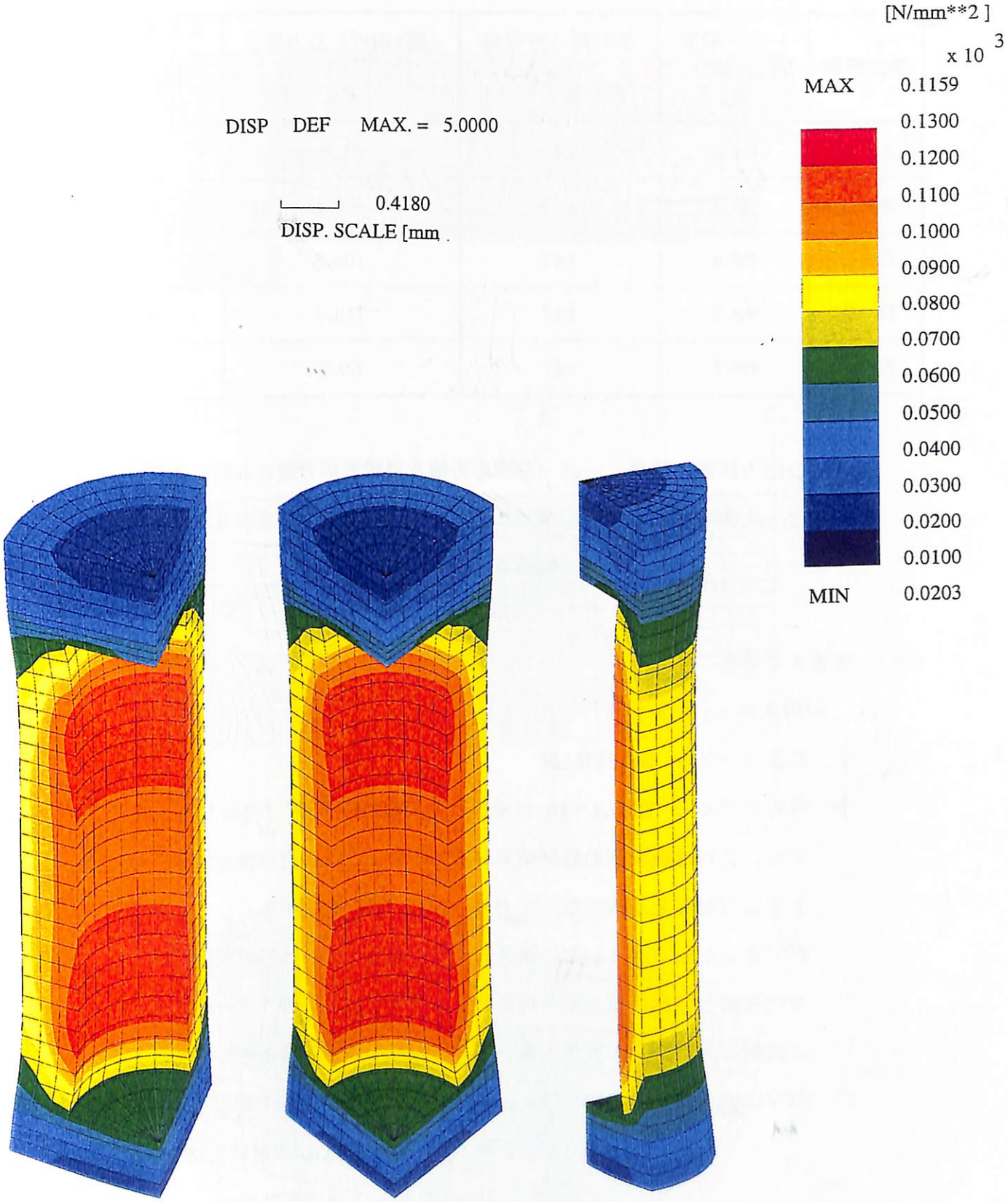


図 5.2－12　縦置きの場合の解析結果

表 5.2－2　縦置きの場合の応力評価結果

単位　N/mm²

評価断面	一次一般膜応力強さ P_m	左記欄の許容値 S_m（設計応力強さ）	（膜+曲げ）応力強さ P_ℓ	左記欄の許容値 $1.5S_m$（設計応力強さの 1.5 倍）
A－A'	64.4	147	75.3	220.5
B－B'	98.5	147	116.4	220.5
C－C'	96.9	147	108.8	220.5
D－D'	98.2	147	115.6	220.5
E－E'	60.7	147	69.4	220.5

以上の応力評価の結果、一次一般膜応力強さは設計応力強さ未満であり、一次一般膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さも設計応力強さの 1.5 倍未満であるので、オーバーパックの健全性は維持される。

(2)　横置きの場合

(a)　解析条件

①　計算コード：　NASTRAN

②　解析モデル：　図 5.2－13 に示すように軸対称（90°）1/8 ソリッドモデルとする。これは縦置きの計算結果から分かるように応力分布は横中心線に対して上下ほぼ対称となってなっており、1/8 ソリッドモデルとしても問題無いと判断できるからである。この場合、蓋と円筒部との付け根の部分の応力と、底板と円筒部との付け根の部分の応力とを比較すると、表 5.2－2 から分かるように底側の方がやや応力が大きいので、底側の方を含む 1/8 モデルとする。

③　SFVC2B 物性値：ヤング率 1.95×10^5 N/mm²　（MITI 告示 501 号別表第 11）(C：0.3%以下)、ポアソン比 0.3、設計応力強さ 147 N/mm² (at 150℃)（MITI 告示 501 号別表第 2）

④　外圧荷重：　垂直及び水平荷重共、最大圧力 34.3MPa とする。

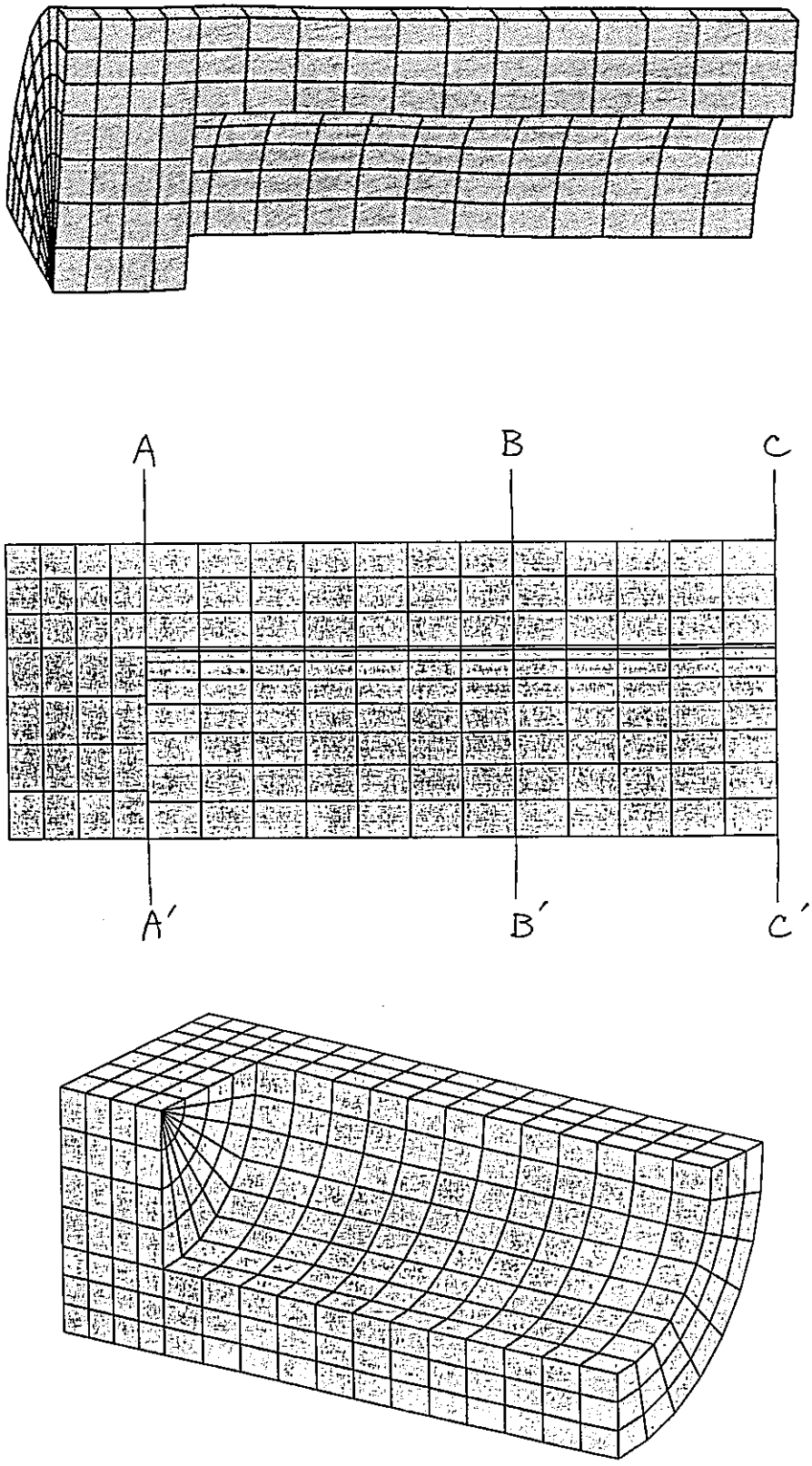


図 5.2－13　横置き解析モデル図

(b) 解析結果

解析結果を図 5.2－14 に示す。同図からどの要素も設計応力強さを下回っていることが分かる。なお、変形を同時に表示しているが、見やすくするため実際の変形量の 10 倍で拡大誇張表示し変形の概念が把握しやすいよう表現している。

(c) 応力評価

応力評価は MITI 告示 501 号第 13 条に基づいて行う。すなわち、

① 一次一般膜応力強さ P_m については　$P_m \leqq S_m$

ここに S_m は設計応力強さで告示 501 別表第 2 より 147 N/mm^2 (at 150℃)

② 一次局部膜応力強さ P_ℓ については　$P_\ell \leqq 1.5\ S_m$

③ 一次膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さ（P_m+P_ℓ）については

$(P_m+P_\ell) \leqq 1.5\ S_m$　　とする。

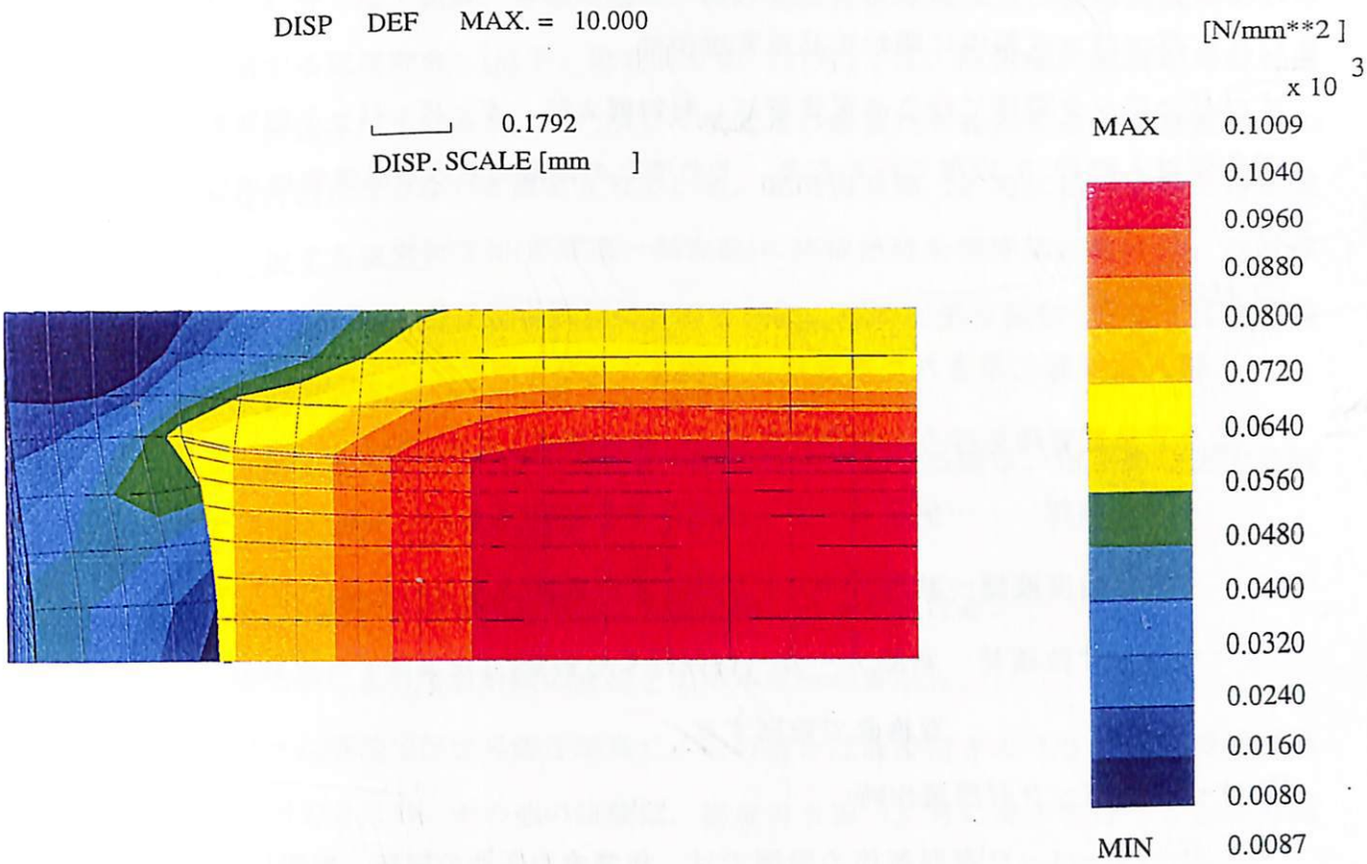
解析の結果が示すように、どの要素の膜応力も 1.1 S_m 未満であるため告示 501 号で定義されている局部膜応力は発生していない。したがって、上記②は本ケースの場合、該当しない。評価位置は解析モデル図に示すように、底と胴体の付け根付近（A－A'断面）、中央付近（応力が最大となっている B－B'断面）及び対称境界面（C－C'断面）の 3 個所とする。　応力評価結果を表 5.2－3 に示す。

表 5.2－3　　横置きの場合の応力評価結果

単位　N/mm^2

評価断面	一次一般膜応力強さ P_m	左記蘭の許容値 S_m（設計応力強さ）	（膜+曲げ）応力強さ P_ℓ	左記蘭の許容値 $1.5S_m$（設計応力強さの 1.5 倍）
A－A'	26.9	147	75.4	220.5
B－B'	76.2	147	101.0	220.5
C－C'	74.9	147	100.0	220.5

以上の応力評価の結果、一次一般膜応力強さは設計応力強さ未満であり、一次一般膜応力と一次曲げ応力を加えて求めた応力強さも設計応力強さの 1.5 倍未満であるので、オーバーパックの健全性は維持される。



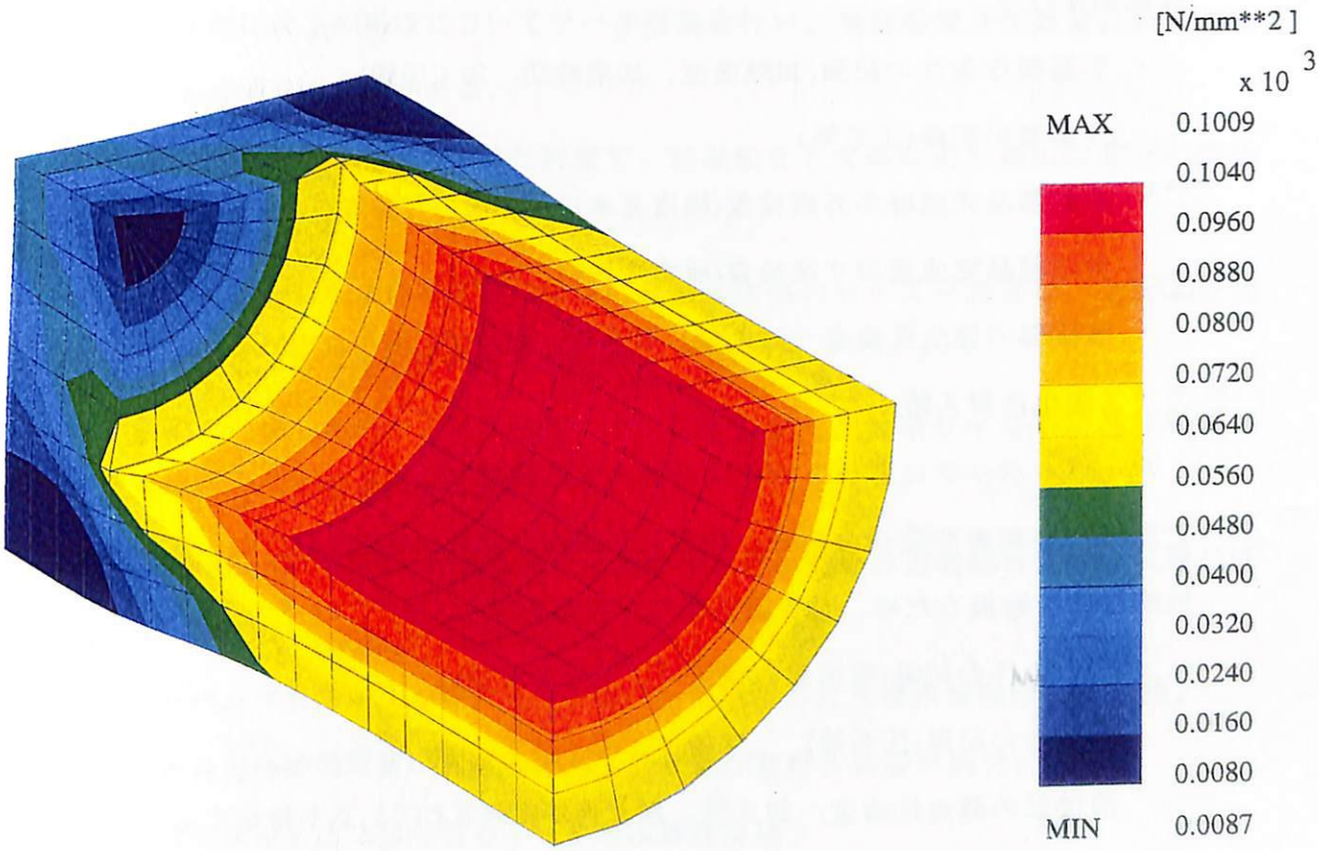


図 5.2－14　横置きの場合の解析結果

6．オーバーパックの品質管理に関する検討

6.1 オーバーパック製作に関わる品質管理項目

オーバーパック製作に伴う品質管理は、材料購入時、オーバーパック容器製作時、ガラス固化体封入時の 3 段階で行われる。それぞれの段階における品質管理項目を以下に示す。

① 材料購入時

購入仕様書に示された検査項目を納品メーカー側で行い、そのデータを確認することで品質管理を行う。必要に応じて、購入側でも検査を行う。

- 材質確認　　…納品メーカーが発行する書類(ミルシート等)で確認する。
- 材料強度確認…納品メーカーが発行する書類(ミルシート等)で確認する。
- 材料寸法確認…納品メーカーが発行する書類(寸法実測データ等)と受入時の抜取検査で確認する。

② オーバーパック容器製作時

オーバーパック容器製作の段階では、作業者や条件の記録、製作した容器の健全性確認を行う。

- 容器製作条件の記録(加熱温度、加熱時間、加工圧等)
- 作業者の記録(氏名等)
- 容器部品完成後の外観検査(限度見本以上の傷の有無等)
- 容器部品完成後の寸法検査(所定寸法の測定値)
- 溶接部の健全性検査…封入性、腐食代、強度が担保されているか確認する。

③ ガラス固化体封入時

オーバーパックにガラス固化体を封入する段階では、オーバーパック容器製作時と同様に作業者や条件の記録、製作した容器の健全性確認を行うが、高レベル放射性廃棄物を取扱うため、全て遠隔操作で作業を行う。

- 封入条件の記録(電流値、電圧値、溶接速度等)
- 作業者の記録(氏名等)
- 溶接部の健全性検査…封入性、腐食代が担保されているか確認する。
- 封入後の放射能濃度確認…封入後、オーバーパックの放射能濃度を測定し、記録する。

総理府令第 73 号「加工施設、再処理施設、特定廃棄物管理施設及び使用施設等の溶接の技術基準に関する総理府令」(以下、総理府令第 73 号)では、溶接部の強度が母材強度と同等以上で、溶込みが十分あり、割れがなく強度及び耐食性を確保する上で有害なものがないものでなければならないと規定されている。総理府令第 73 号に定められた特定廃棄物管理施設に属する廃棄物容器(廃棄第一種容器)の溶接部健全性確認試験には、放射線透過試験・超音波探傷試験・浸透探傷試験の非破壊試験、継手引張り試験・型曲げ試験の機械試験、耐圧試験がある。

ガラス固化体封入後のオーバーパックの溶接健全性を確認する際は、以下の理由で放射線透過試験を採用することができない。

① ガラス固化体内の放射線強度がガラス固化体によって異なる。

② ガラス固化体によって放射線の波長とエネルギーが異なる。

封入は電子ビーム溶接で行う可能性が高く、その場合は溶接深さの 1/2 ごとの浸透探傷試験を行うことができない。その他の試験は、総理府令第 73 号に従って行うことが可能であると思われる。

実生産を行う前に以下の項目についてデータ収集を行い、溶接部健全性確認試験の判定基準の妥当性を確認する必要がある。

① オーバーパック素材に選定された材質で、結晶粒径と欠陥の最小検出限度との関係を調べる。

② 強度解析結果等から溶接部健全性確認に必要な欠陥のサイズを設定し、上記①評価結果より対応する結晶粒径範囲を求める。

③ 継手引張り試験等のデータによって、上記②で設定した欠陥サイズや結晶粒径範囲が妥当であることを裏付ける。

ガラス固化体封入後の溶接健全性確認を遠隔操作で行うための自動超音波探傷装置の開発項目を以下に示す。

・ オーバーパック表面が 100℃以上になることを想定した高温用接触媒質の選定。

・ 測定後の高温用接触媒質の剥離等、ハンドリングを行う装置の開発。

・ 自動超音波探傷装置で得られるデータの信頼性評価。

6.2 オーバーパックの溶接部の検査方法

6.2.1 超音波探傷試験法 [1]

(1)超音波探傷試験法の概要

JIS Z 2344 では、周波数が 20kHz 以上の音波と定義している。鋼・銅・アルミ・チタン等の金属材料の超音波探傷試験では、0.5～10MHz の周波数が使われることが多い。超音波は固体中を伝播しボイドや介在物などにあたると、一部は反射して超音波発生源に戻り、一部は入射ビームに対して特定の角度で反射し、一部は減衰し、一部は屈折する。この超音波の反射や減衰を利用すると、金属部品の様々な傷の有無を検出できる。

超音波探傷試験方法の種類を図 6.2－1 に示す。直接探傷法は手動探傷で多く用いられ、水浸法は自動探傷手段として主に用いられる。また、非接触法は高温材や粗い表面を有する材料の探傷などに利用され、影像法は主に電子部品などの軽薄探傷部品の検査に適用される。

超音波探傷試験法では一般にパルス波が使用され、パルス反射法およびパルス透過法が用いられる。

探傷結果の表示または記録方式としては図 6.2－2 に示すように、基本(A スコープ)表示、断面(B スコープ)表示および平面(C スコープ)表示が用いられている。

溶接部分の検査によく使用されるのは、直接接触法の垂直法と斜角法である。直接接触法は試験体表面にマシン油やグリセリン等の接触媒質を塗布し、探触子を直接接触させながら探傷する方法である。

・垂直法

垂直法は、試験体表面に対して垂直方向に超音波を伝播させる方法で、通常縦波が用いられる。鋳造鋼品・圧延鋼材・条鋼・クラッド材等の検査に適用される。

・斜角法

斜角法は探傷面に対して斜めの方向に超音波を伝播させる方法である。通常の斜角探触子では、くさび角を屈折縦波の臨界角以上に設定して横波だけが試験体に伝播するように作られている。

コンピュータを使ったデータ収集方式やデータ処理方式が開発され、試験時間の短縮とデータ精度の向上が図られている。

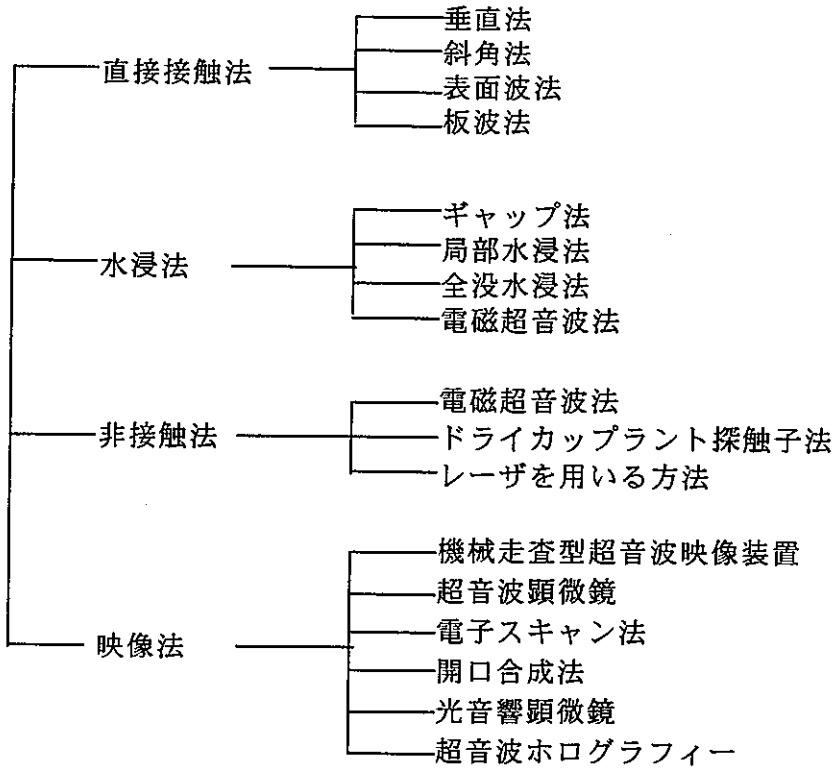


図 6.2－1　超音波探傷試験方法の種類 (1)

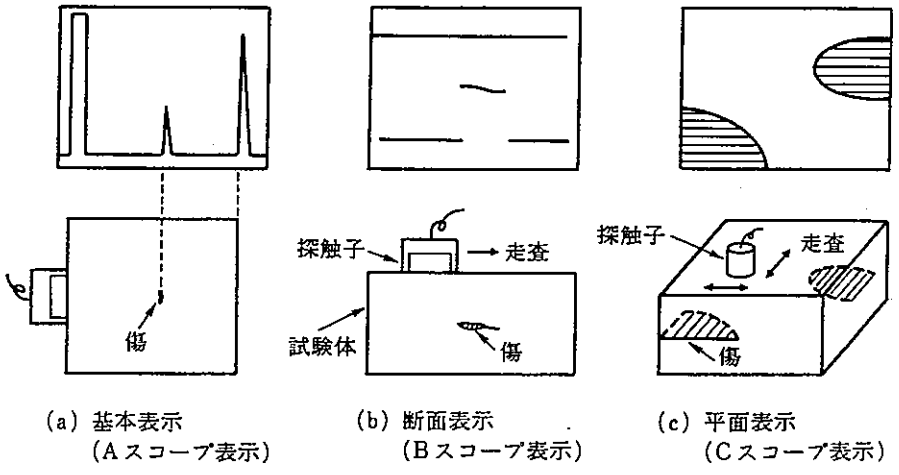


図 6.2－2　検査結果の表示方法 (1)

(2)オーバーパック最終封止時に超音波探傷試験を適用する際の留意事項

オーバーパック最終封止時に超音波探傷試験を適用する場合の留意事項を以下に示す。

① 容器形状と測定方法との組合せで決まる検出感度を把握する必要がある。

② 直接接触法の垂直法を用いる場合は、表面近傍に不感帯が生じるため、横方向からの検査が可能となるような容器設計とするべきである。

③ オーバーパック表面温度が 100℃以上になる場合、水浸法は水の気化の影響で精度が低下することが予想される。

④ オーバーパック最終封止時の超音波探傷試験は、強い放射線環境下での測定となる。遠隔自動測定は現状技術の応用で対応可能であると思われるが、耐放射線を考慮した試験方法や機器類の開発を行う必要がある。

⑤ 非接触法は、直接接触法や水浸法と比較して一般産業界ではあまり広く用いられていない。しかし、例えばレーザを用いる方法は試験体表面状態の影響を受けず、試験体表面から数 m～数十 m 離れた距離からでも探傷できる[1]ことから、今後の技術開発によってはオーバーパックの検査に適用できる有望な超音波探傷試験法となり得ると思われる。

6.2.2 漏洩試験法 (2)

(1)漏洩試験法の概要

漏洩試験には、アンモニアリーク試験・ヘリウムリーク試験・ハロゲンリーク試験等がある。表 6.2－1に主な漏洩試験方法を示す。オーバーパックへの適用法としては、試験後の残留ガスが容器本体の素材との間に生じる長期にわたる化学作用で、容器寿命等にどのような影響を与えるかが不明なため、化学的に安定なヘリウムガスを用いたヘリウムリーク試験が各国で検討されている。

ヘリウムリーク試験はヘリウムガスと質量分析計型ヘリウム漏れ検出器を用い、漏れ量と漏れ箇所を検出する漏れ試験である。非常に微少な 1×10^{-12} Pa·m³/sec 程度の漏れまで検出することが出きる上に非常に手軽で正確でしかも検査時間も短いので広範囲に適用されている。試験法法として次の 8 種類がある。

- 真空吹き付け法
- 真空外覆法
- 真空積分法
- 吹込法
- 加圧積分法
- 吸盤法
- 真空容器法
- 浸せき法

ヘリウムデテクター(質量分析器)を用いるこの方法は、漏れ試験法として最も感度が良い方法といわれている。原理・感度等を以下に示す。

表 6.2－1　主な漏洩試験方法

項目	アンモニアリーク試験	ハロゲンリーク試験	ヘリウムリーク試験
サーチガス	アンモニア	ハロゲン系ガス (SF_6等)	ヘリウム
検出原理	試験体表面に塗布した試験剤(ブロムフェノールブルー)が漏れ出たアンモニアと化学反応して変色する。	電子捕獲ガス検出器内に SF_6 ガス等が導入されると検出器を流れていた定常電流が低下する。	質量分析器で漏れ出たヘリウムを検出する。(詳しくは、本文参照)
感度(Pa·m³/S)	10^{-4}～10^{-5}	2×10^{-7}	5×10^{-9}
オーバーパックへの適用性	アンモニアが銅や銅合金を腐食する。	世界的にフロンガスの使用が禁止される方向にある。	検出感度が高く、ヘリウムは化学的に安定なため、適している。

a. 原理

試験体の漏れ箇所から漏れてきた微量の He は、ポンプによって分析管に導入される。分析管に入った He は、イオン化室の中でフィラメントからアノードに流れる電子ビームによってイオン化される。このイオンは、イオン化室とスリットとの間にかけられた加速電圧によって加速され、スリットを通って射出される。この途中、図 6.2－3 に示す方向に磁場をかけておくと、イオンは円軌道を描いて曲がる。このとき円の半径 r はイオンの質量によって、次式にしたがって変化する。

$$M/e = 4.796\times10^{-5}\times(rB)^2/V \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{式 (6.2－1)}$$

ここで、M:イオンの質量(原子の質量単位)、e:イオンの荷電子、V:加速電圧、B:磁場の磁束密度である。

ヘリウムでは、M／e ＝ 4 の He イオンのみを検出するようにする。すなわち、V を調節し、r を一定にしてコレクタで He イオンのみを捕らえられるようにし、この電流を増幅してメーター上に指示させる。このメーターの振れは、デテクターに入った He の量、すなわち漏れの量に比例する。この原理はいかなる元素分析にも利用し得る。

b. 検出感度

固有感度は、5×10^{-9} Pa･m³/sec で、分圧感度は 0.5ppm 以下である。

c. 使用温度範囲と許容湿度

使用温度範囲は、-5℃ ～ 45℃で、許容湿度は 95%以下である。

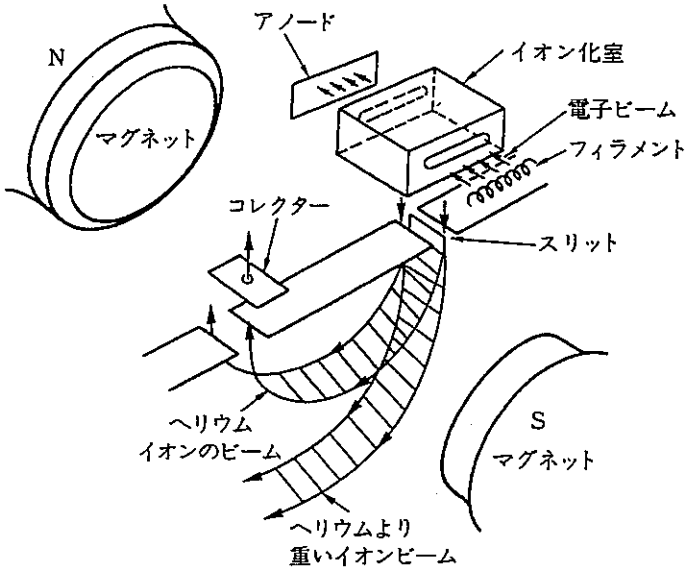


図 6.2－3　ヘリウムデテクターの原理 (2)

d. サンプリング

サンプリングプローブを使用して、表面を数十 cm/min の速度で移動しながら吸引し、サンプリングガスを採取する。

サーチガスとして、ヘリウムガスを用いる場合の長所には次に示すものがある。

① 空気中に約 5ppm しか存在しないので、他のガスと区別しやすい。

② 真空材料等からの放出ガス中にもほとんど含まれていない。

③ 軽い気体なので分析管が比較的に小さくてすむ。

④ 分子直径が小さい気体で、小さい孔からももれやすく検出が容易である。

⑤ 化学的に不活性で無害である。

⑥ 真空装置内の壁面に吸着しにくいので、繰り返し測定し測定時に前歴が残らない。

(2)オーバーパック最終封止時にヘリウムリーク試験を適用する際の留意事項

オーバーパックの最終封止を行った後に超音波探傷試験では検出できない微少な貫通穴の有無を評価するためにはヘリウムリーク試験が適用できる。以下にヘリウムリーク試験を適用する際の留意事項を示す。

・加圧法または減圧法を採用した場合、耐食層を貫くヘリウム注入孔の設置が必要となる。試験終了後、注入孔の密閉・検査を遠隔で行う必要があり、現状の技術では実施が困難である。

・最終封止溶接法に電子ビーム溶接を選定した場合、通常は真空中で溶接を行うため、溶接前にヘリウムの充填を行うことができない。

現状の技術で実施可能と思われる試験方法を以下に示す。

a. 加圧－減圧法[3]

試験フローを以下に示す。

① 蓋溶接及びＵＴ検査等の終了したオーバーパックを耐圧容器に入れたのち、容器内に高圧のヘリウムガスを充填する。

② 欠陥がある場合は、ヘリウムガスがオーバーパック内に侵入する。

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 欠陥がある場合はチャンバー内部を真空にするとオーバーパック内からヘリウムガスが流出し、欠陥があることが分かる。

加圧－減圧法の問題点を以下に示す。

・オーバーパック内に導入されるヘリウムガス量が分からない。そのため、検出感度等の評価ができない。

・耐圧容器等の装置開発が必要。

・未知の試験パラメータが多い。(ヘリウム充填圧力、ヘリウム充填時間、チャンバー内の真空度等)

b. 溶接前ヘリウム充填法(電子ビーム溶接採用時)

試験フローを以下に示す。

① 蓋溶接時の雰囲気を通常の電子ビーム溶接条件である高真空(10^{-4}torr 程度)から低真空(10^{-1}～10^{-2}torr)のヘリウム雰囲気に変更する。

② 蓋溶接後、オーバーパックを真空チャンバー内に移し、溶接雰囲気よりも高い真空度でヘリウムリーク試験を行う。

溶接前ヘリウム充填法の問題点を以下に示す。

・低真空雰囲気での溶接性を確認する必要がある。

・溶接時のヘリウム圧力とリーク試験時の真空度、リーク試験の検出感度等との関係を調査する必要がある。

この方法は、溶接性が確保できればヘリウム充填条件を一定にすることが可能であるため、加圧－減圧法よりも有望であると考えられる。

6.3 放射能濃度の確認方法 (4)(5)

放射性廃棄物の放射能濃度確認方法には、以下に示すものがある。

① 一般に知られているデータに基づいて、計算・推定する。

② 一つの廃棄体について線量率測定を行い、その他の廃棄体も同位体組成が同じと仮定し、放射能濃度を計算・推定する。

③ それぞれの廃棄体について全放射能または特定核種(キー核種)の比放射能を測定し、標準試料を用いてそれぞれの核種の放射能濃度を計算・推定する。キー核種には、測定しやすい核種やスケーリングファクターの値が得られている核種を選定する。

放射性廃棄物の放射能測定方法には、非破壊分析法(Non-Destructive assay 法)がよく用いられる。非破壊分析法は、測定精度の上では破壊分析法(Destructive assay 法)よりも劣るが、装置の簡略化・自動化・オンライン化が図りやすく、コストと測定時間の面で有利である。

参考文献4では、一般的な放射性廃棄物の非破壊分析法として、パッシブγ線法・パッシブ中性子同時計数法・パッシブーアクティブ中性子法等が紹介されている。

6.3.1 パッシブγ線法

パッシブγ線法は、最も多く用いられる方法である。試料のγ線強度及びその検出効率が高いので装置を簡易化しやすい特徴を持つが、比較的低エネルギーのγ線を利用するため透過力が小さい欠点がある。一般に利用されているのは、^{235}U の 185 keV・^{238}U の 1001 keV・^{239}Pu の 414 keV のエネルギーのγ線ピークである。

γ線検出器には、エネルギー分解能が高い Ge 検出器(高純度ゲルマニウム検出器とリチウム添加ゲルマニウム検出器がある。) あるいはエネルギー分解能では劣るが安価で保守性の良い NaI(TI)検出器が使用される。

Ge 検出器を用いた装置に SGS (Segmented Gamma Scanner)分析装置がある。この装置では、廃棄体の軸方向に 10～20 の区分に分けて、廃棄体を回転させながら測定を行う。廃棄体を回転させるのは、径方向の不均一性の影響を少なくするためである。正確な SGS 分析を行うためには経験上、廃棄体が 0.5%以上のγ線透過係数を持つ必要があることが分かっている。他の SGS 分析の誤差要因は、廃棄体の軸方向の組成変動と密度変動が考えられる。廃棄体内に放射能の集中箇所がある廃棄体形態は、本質的に SGS 分析には適していない。

6.3.2 パッシブ中性子同時計数((Passive Neutron Coincidence Counting)法

PNCC 法は、自発核分裂で放出される複数個の中性子を適当なゲート幅で同時計測して、(α、n)反応で単発的に発生する中性子と分別し、自発核分裂物質の測定を行う方法である。廃棄体中に含まれる同位体に関する情報があれば、検出される同時発生率から全放射能を計算することができる。廃棄体中に自発核分裂元素が複数含まれる場合は、それぞれの濃度比が分かっていないとそれらの定量はできない。

PNCC 法の誤差は、プルトニウム化合物や廃棄体の化学形態の違いによる(α、n)反応が起こる確率が異なることに起因する。(α、n)反応の寄与による誤差は、放射能濃度を高く見積ることになる。

6.3.3 パッシブ－アクティブ中性子(Passive-Active Neutron)法

PAN 分析システムは、パッシブ中性子分析を行う部分とアクティブ中性子分析を行う部分の 2 つの独立した分析ユニットから構成される。パッシブ中性子分析部分は PNCC 法とほぼ同じである。アクティブ部分では、中性子発生器から放出された短パルスの高エネルギー中性子は、グラファイトやポリエチレン壁、廃棄体内の中間材などと何度も衝突することで熱化する。熱化された中性子パルスはある時間（例えば、半減期が約 400μs）持続する。この間に廃棄体内で ^{239}Pu や他の核分裂同位体の核分裂が誘発される。アクティブ中性子分析では、この誘発された核分裂に伴って放出される即発中性子などを検出する。廃棄体マトリックスによる中性子の吸収と減速がアクティブ中性子分析の感度に影響する。

6.3.4. その他の方法

放射性廃棄体の NDA 法として、熱量測定や X 線断面撮影も用いられる。

熱量分析は、高レベル廃棄体等の小さな廃棄体に適用される。プルトニウム化合物から放出される一次熱はα崩壊とβ崩壊によるもので、あらかじめ同位体組成が判っていれば、化学量論的組成が不明でも正確なプルトニウム量が容易に求められる。

X線断面撮影法には、放射法と透過法がある。放射X線断面撮影法では、試料中の放射能分布を視覚化する。透過X線断面撮影法では、試料密度を視覚化する。放射X線断面撮影法では、データ解析時に透過X線断面撮影法のデータが必要である。X線断面撮影法の特徴は、廃棄体マトリックスの密度や放射性核種の分布に起因する誤差を回避できる点と、

廃棄体内に放射性核種が凝集した「ホットスポット」を比較的識別しやすい点である。特に後者については、特定できた「ホットスポット」を除去できれば、例えば中レベル廃棄物に分類されていた廃棄体を低レベル廃棄物に再分類できる可能性が生れる。これは、高いレベルの放射性廃棄体の減容につながり、処分コストが低減される。

6.3.5 オーバーパック最終封止後に放射能濃度確認を行う際の留意事項

一般にガラス固化体に適用される非破壊分析方法としてパッシブ中性子法、アクティブ中性子法、熱量分析等が挙げられる。ガラス固化体には熱中性子吸収物質であるホウ素が多量に含まれているため、中性子検出感度が極めて低い。[6] オーバーパック最終封止後の放射能濃度確認では、オーバーパックによる検出感度低下が考えられる。測定方法を選定するに当っては、検出限界や検出精度に関する基礎データを予め収集する必要がある。

オーバーパック最終封止後に行う放射能濃度測定は遠隔自動測定で行われることが想定される。遠隔自動測定技術は、本章で紹介した各測定方法について現状技術の応用で対応可能であると考えられる。

7. オーバーパックの放射線損傷に関する検討

7.1 はじめに

複合オーバーパックは、ガラス固化体と接する内側を炭素鋼、外側をチタンあるいは銅とし、構造強度は内側の炭素鋼で確保することとしている。したがって、オーバーパックの設計（構造解析）には炭素鋼の機械的性質に関する特性値を設定する必要があり、これに影響を及ぼし得る因子として地層処分後の温度と放射線を考慮しなければならない。本章では、このうち地層処分後のガラス固化体から放出される放射線による炭素鋼の機械的性質への影響を検討することとする。

本章の検討では、米国のサウスカロライナ州 Savannah River Site で使用されている高レベル放射性廃液貯蔵タンクの炭素鋼に対する放射線損傷の可能性を検討した文献[1]を参考とした。

7.1.1 炭素鋼の機械的性質に影響を及ぼし得る放射線

ガラス固化体からは、主にα線、β線、ガンマ線、中性子が放出されるが、このうちα線とβ線は飛程が短くその大部分はガラス固化体中で吸収され、ガラス固化体表面近傍からのα線とβ線も炭素鋼中での飛程は数μm 以下と考えられる。したがって、ガラス固化体から放出されるα線とβ線が炭素鋼に与える損傷は、炭素鋼内側の極表層部分に限局され、構造材としての炭素鋼への影響はほとんど無視できると考えられる。すなわち、ガラス固化体から放出されるガンマ線と中性子だけが、原子のはじき出しにより炭素鋼の機械的性質に影響を及ぼす可能性があると考えられる。

7.1.2 炭素鋼の放射線損傷[2],[3],[4]

放射線による原子のはじき出しに起因する炭素鋼（フェライト鋼）の機械的性質の変化として、一般に照射脆化と照射硬化が挙げられる。主に前者は延性－脆性遷移温度（DBTT：Ductile-Brittle Transition Temperature）の上昇、後者は強度の上昇として検出される。特に、DBTT の変化は、炭素鋼（フェライト鋼）の放射線損傷に対する抵抗性を判断する代表的な機械的性質と考えられている[1]。

7.2 dpa（displacement per atom；材料原子当たりのはじき出し数）[2],[3],[5]

材料の DBTT 変化は、放射線の種類、エネルギー、照射量と非常に関係が深いが、材料

原子当たりのはじき出し数（dpa）の概念を導入することにより、これらの異なる放射線環境下での DBTT 変化を比較することができる。ここで、dpa は放射線照射中における材料中の欠陥の回復を考慮しておらず、dpa は放射線照射により材料中に生成される欠陥量というよりもむしろ照射量を与える量と考えられる点で注意を要する。

dpa は以下の式で表される。

$$dpa = \int_0^{t_r} \int_0^{\infty} \sigma_d(E)\phi(E,t)dEdt$$

ここで、

$\sigma_d(E)$　：はじき出し断面積

$\phi(E,t)dE$　：時刻tにおけるエネルギーEとE + dEの間の入射粒子のフラックス

t_r　：照射時間

もし、$\phi(E,t)$が時間に依存せず$\phi(E)$で一定で、エネルギーが幾つかの群に離散化されているとすると、dpaは以下のように記述される。

$$dpa = t_r \int_0^{\infty} \sigma_d(E)\phi(E)dE \approx t_r \sum_{i=1}^{N} (\sigma_d)_i \phi_i \Delta E_i = t_r \sum_{i=1}^{N} (\sigma_d)_i (\phi_{tot})_i$$

ここで、

$(\sigma_d)_i, \phi_i$　：エネルギー$E_i < E < E_{i+1}$のi群の平均値

ΔE_i　：i群のエネルギー幅$(E_{i+1} - E_i)$

$(\phi_{tot})_i$　：i群の全フラックス

N　：群の総数

はじき出し断面積σ_dは、入射粒子の種類及びエネルギー、材料の種類により異なるが、ガンマ線及び中性子に対する鉄（炭素鋼に適用できる。）のはじき出し断面積について以下に述べる。

7.2.1　ガンマ線に対する鉄のはじき出し断面積

ガンマ線による放射線損傷は、実質的には、コンプトン効果や光電効果によって生じた電子、及び電子対生成によって生じた陽電子と電子とによる[2]。したがって、電子の材料中での飛程は短いため材料が厚い時には電子の材料中での減速を考慮する必要がある。

ガンマ線に対する鉄のはじき出し断面積を表 7.2-1[6]に示す。また、これをプロットして図 7.2-1 に示す。ここで、はじき出し断面積は鉄の電子当たりの値となっている。はじき出し断面積はガンマ線のエネルギーの上昇とともに上昇する傾向がある。

7.2.2　中性子に対する鉄のはじき出し断面積

中性子に対する鉄のはじき出し断面積を図 7.2-2[5]に示す。中性子の場合、ガンマ線の場合とはかなり傾向が異なる。

表 7.2-1　ガンマ線に対する鉄のはじき出し断面積[6]

ｶﾞﾝﾏ線ｴﾈﾙｷﾞｰ (MeV)	鉄の電子当たりのはじき出し断面積 (mb)	
	40eV*1	28eV*1
0.5	0.00	0.00
1.0	0.22	1.59
1.5	2.93	9.49
2.0	8.33	21.89
2.5	15.75	37.01
3.0	24.76	54.55
3.5	35.27	74.23
4.0	47.24	95.99
4.5	60.62	119.75
5.0	75.40	145.47
5.5	91.53	173.10
6.0	108.95	202.62
6.5	127.64	234.07
7.0	147.58	267.49
7.5	168.64	302.66
8.0	191.17	340.21
8.5	214.76	379.42
9.0	239.52	420.46
9.5	265.35	463.17
10.0	292.30	507.61

＊1：はじき出しのしきいエネルギー；通常では 40eV が適用される。

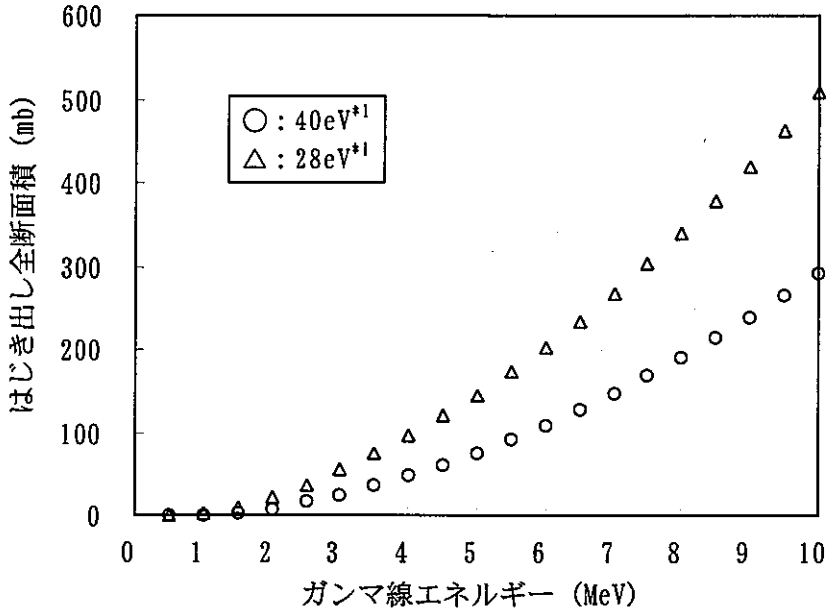


図7.2-1 ガンマ線に対する鉄のはじき出し断面積
(*1：はじき出しのしきいエネルギー)

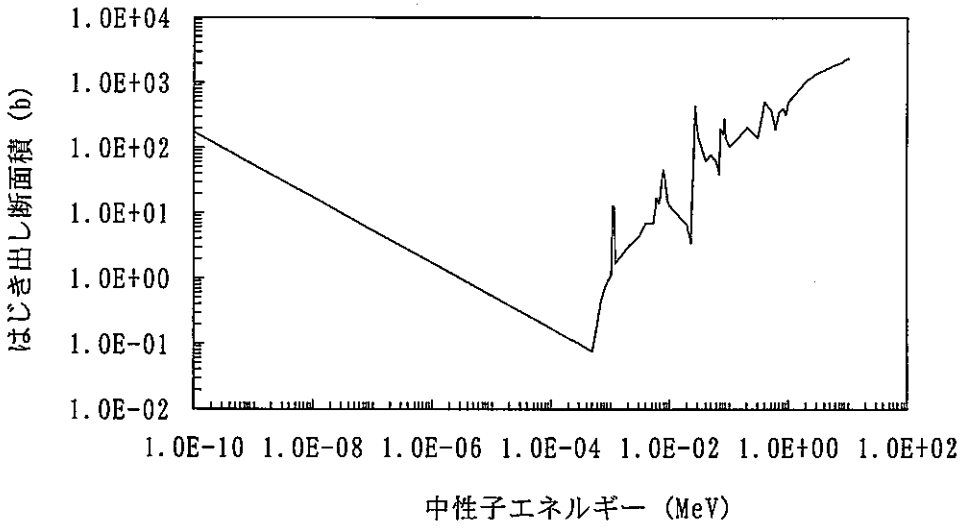


図7.2-2 中性子エネルギーの関数としてプロットされた
鉄のはじき出し断面積[5]

7.3 オーバーパックの炭素鋼の dpa

オーバーパックの炭素鋼が地層処分後に受ける dpa を計算するために、炭素鋼が地層処分後に受ける放射線のフラックス及びはじき出し断面積を各エネルギー群について以下で求める。

7.3.1 フラックス計算

7.3.1.1 計算方法

ガラス固化体の線源条件及びその他の主な条件は、報告書(7)記載のものを使用した。以下に各条件について示す。

(1) 線源

(a) 線源の仕様

線源として想定する使用済燃料の初期濃縮度及び燃焼度は、六ヶ所再処理工場の標準燃料である 4.5wt%、45,000MWd/t とし、炉取出し後再処理までの冷却期間を 4 年とする。また、再処理後のガラス固化体としての中間貯蔵期間については、原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画（平成 6 年原子力委員会）において 30 年から 50 年と定められているが、ここでは最も保守的な結果を与える 30 年とする[8]。ガラス固化体の仕様を表 7.3-1 に示す。

(b) 線源強度

報告書(7)により、線源強度は以下の値を使用した。これらの線源強度は、燃焼計算コード ORIGEN2 により表 7.3-1 に基づき算出されたものである。

ガンマ線源強度：4.117×10^{15}（γ/sec/本）

中性子線源強度：1.93×10^{8}　(n/sec/本)

ただし、中性子線源強度のうち（α,n）反応により発生する中性子については、ORIGEN2 コードが酸素 (O) のみを考慮しているため ORIGEN2 コードの計算結果は使用せず、ガラス固化体の軽元素組成を考慮して JAERI-1324 の手法に基づき算出されている。

(c) エネルギースペクトル

ガンマ線のエネルギースペクトルは、参考文献(7)記載の ORIGEN2 出力結果を比例配分により DLC-23E 群構造に変換して使用し、これを表 7.3-2 に示す。

また、中性子のエネルギースペクトルは、参考文献(7)に記載される表 7.3-3 の値をそのまま使用した。これは、自発核分裂よりもスペクトルが硬い Cm-242 の（α,n）反応による中性子のエネルギースペクトルを DLC-23E 群構造に変換したものである。

(2) 計算コード及び核データ

ガンマ線源及び中性子線源の計算にはともに、２次元輸送計算コード DOT-3.5 を使用し、核データとして DLC-23E ライブラリを使用した。

(3) 計算モデル

地層処分後のオーバーパックを模擬し、円筒体系として計算のモデル化を行った。

ガラス固化体の形状及び寸法については、六ヶ所 高レベル廃液固化・貯蔵施設のガラス固化体キャニスターにおける外形寸法（概念仕様：半径 215mm、高さ 1340mm）とし、キャニスターの機器厚みは考慮しない。

ガラス固化体を囲むオーバーパックの機器厚みは、当該オーバーパック設計の公称寸法とし、ガラス固化体とオーバーパックの隙間は０とした。ここで、腐食を想定しオーバーパックの銅容器部分を考慮する場合としない場合の２条件を設定した。

オーバーパックの周囲には緩衝材、さらにその周囲には岩盤が存在し、これらはガンマ線及び中性子の反射材となる。したがって、反射材としての影響を比較するために、オーバーパックの周囲を全て緩衝材とした場合と全て岩盤とした場合の２条件を設定した。

フラックスの計算点としては、炭素鋼の受けるガンマ線または中性子のフラックスが最大となる点を考慮するために、ガラス固化体表面（炭素鋼との境界）で径方向、上方向、下方向の３点を設定した。したがって、炭素鋼は計算点に対して反射材としての影響を及ぼす。ここで、ガンマ線と炭素鋼の反応断面積は大きく、炭素鋼（一番薄い径方向でも厚さ 120mm）はガンマ線に対する反射材として十分な厚さを有している考えられることから、ガンマ線源の場合、炭素鋼の周囲の物質は計算点にほとんど影響を及ぼさないと考えられる。よって、ガンマ線源

の場合、炭素鋼の周囲を銅、さらにその周囲を岩盤と、一意的に設定するものとした。

以上による計算モデルを図 7.3-1 に示す。

(4) 物質の組成及び密度

計算に使用した物質の組成及び密度を表 7.3-4 に示す。ガラス固化体の組成及び密度については、六ヶ所再処理工場で発生すると想定されているガラス固化体標準仕様に従うものとした。また、オーバーパックの構成材料については現実的な値を設定し、岩盤については火成岩平均組成を引用した。また、緩衝材としては 100%ベントナイト（クニゲル V1）とし、緩衝材の圧縮密度を 1.8g/cm^3（乾燥密度）[9]、放射線に対する反射材としての保守性の観点から含水比は 18.5%（飽和状態）とした。

表 7.3-1　ガラス固化体の仕様

燃料条件	炉型	PWR
	燃焼度	45,000MWd/t
	比出力	38MW/t
	初期濃縮度	4.5wt%
再処理条件	再処理前冷却期間	4 年
	移行率	U：0.3% Pu：0.6% 希ガス、ハロゲン：0.0% その他：100%
	中間貯蔵期間	30 年

表7.3-2 ガンマ線エネルギースペクトル（DLC-23E群構造）

上限ｴﾈﾙｷﾞｰ (MeV)	ガンマ線ｴﾈﾙｷﾞｰｽﾍﾟｸﾄﾙ (γ/sec/本)
1.00E+01	6.327E+04
8.00E+00	4.130E+05
6.50E+00	2.526E+06
5.00E+00	2.388E+06
4.00E+00	1.116E+07
3.00E+00	1.413E+07
2.50E+00	4.124E+07
2.00E+00	4.381E+11
1.66E+00	6.265E+12
1.33E+00	1.176E+13
1.00E+00	1.407E+13
8.00E-01	7.566E+14
6.00E-01	1.139E+15
4.00E-01	2.946E+13
3.00E-01	7.033E+13
2.00E-01	1.269E+14
1.00E-01	3.023E+14
5.00E-02	1.659E+15
合計	4.116E+15

表 7.3-3 中性子エネルギースペクトル（DLC-23E 群構造）

上限ｴﾈﾙｷﾞｰ (MeV)	中性子線ｴﾈﾙｷﾞｰｽﾍﾟｸﾄﾙ (n/sec/本)
1.50E+01	0.000E+00
1.22E+01	0.000E+00
1.00E+01	0.000E+00
8.18E+00	0.000E+00
6.36E+00	0.000E+00
4.96E+00	1.011E+07
4.06E+00	7.608E+07
3.01E+00	5.402E+07
2.46E+00	8.994E+06
2.35E+00	2.909E+07
1.83E+00	1.320E+07
1.11E+00	1.293E+06
5.50E-01	2.123E+05
1.11E-01	0.000E+00
3.35E-03	0.000E+00
5.83E-04	0.000E+00
1.01E-04	0.000E+00
2.90E-05	0.000E+00
1.07E-05	0.000E+00
3.06E-06	0.000E+00
1.12E-06	0.000E+00
4.14E-07	0.000E+00
合計	1.930E+08

計算ケース		
線源	岩盤または緩衝材の選択	ｵｰﾊﾞｰﾊﾟｯｸの銅の有無
ガンマ線	岩盤	有
中性子	岩盤	有
	緩衝材	有
	岩盤	無
	緩衝材	無

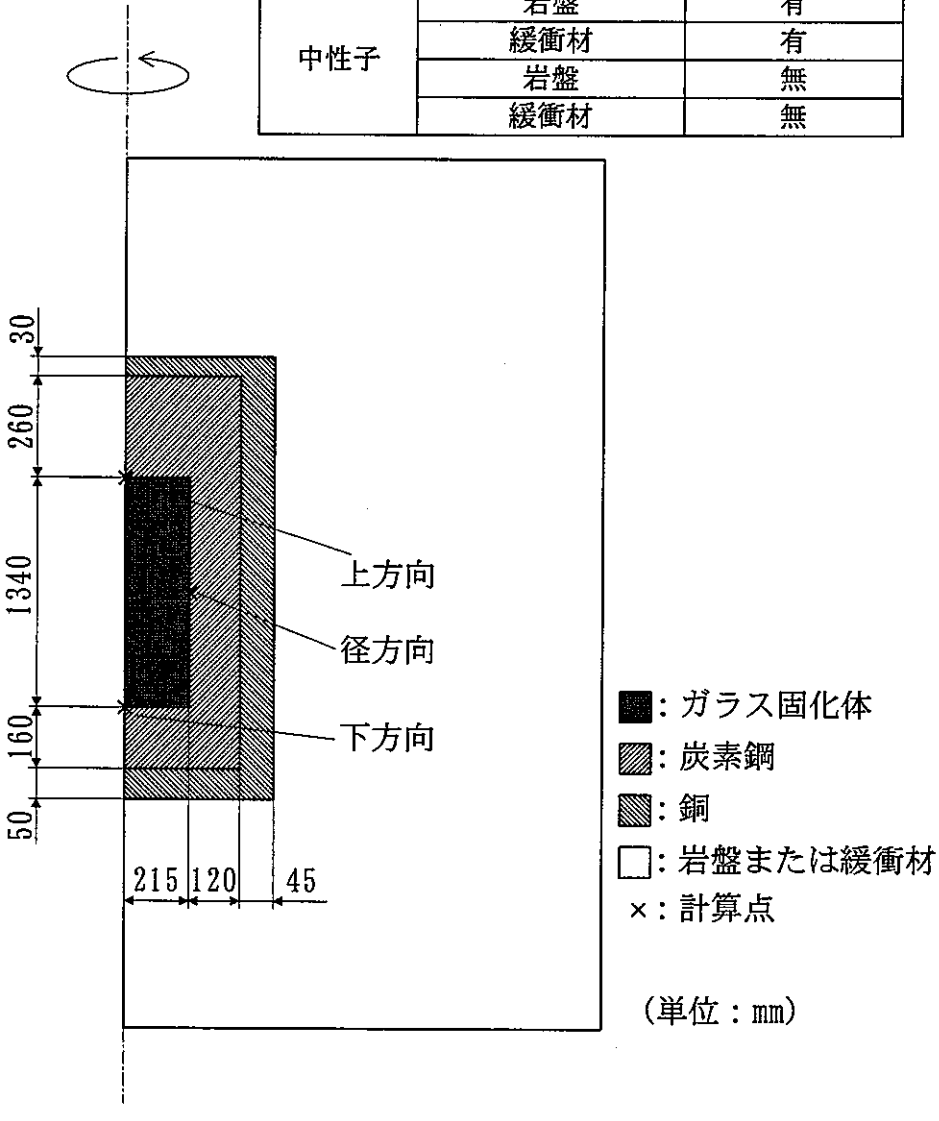


図7.3-1 フラックス計算モデル（円筒体系）

表 7.3－4(1)　計算に使用した物質の組成及び密度（1）

ガラス固化体

（密度：2.6g/cm³）

元素	組成比 (wt%)	密度 (g/cm³)	原子個数密度 (atoms/b·cm)
Ｌｉ*1	1.39	—	—
Ｂ*2	4.44	0.115	1.26E-03
Ｏ	47.7	1.24	4.66E-02
Ｎａ	7.42	0.193	5.05E-03
Ａｌ	2.65	0.0689	1.54E-03
Ｓｉ	21.8	0.566	1.21E-02
Ｃａ	2.14	0.0556	8.35E-04
Ｚｎ*1	2.40	—	—
Ｍｏ*3	10.2	0.265	1.66E-03

*1：DLC-23E ライブラリにないＬｉ，Ｚｎは計算上では考慮しない。
*2：ＢはDLC-23E ライブラリにＢ-10 しかないため、計算上では 100% Ｂ-10 とする。
*3：ＦＰ及びアクチニド酸化物をＭｏで代用する。

炭素鋼

（密度：7.85g/cm³）

元素	組成比 (wt%)	密度 (g/cm³)	原子個数密度 (atoms/b·cm)
Fe	100	7.85	8.465E-02

(注1) SFVC 2B（JIS G 3202），密度の出典は、熱間圧延鋼板及び鋼帯の形状、寸法、質量及びその許容差（JIS G 3193）

銅

（密度：8.94g/cm³）

元素	組成比 (wt%)	密度 (g/cm³)	原子個数密度 (atoms/b·cm)
Cu	100	8.94	8.472E-02

(注1) C1011（JIS H 3510），密度の出典は、日本伸銅協会：「伸銅品データブック」，平成 9 年 8 月 1 日

表 7.3－4(2)　計算に使用した物質の組成及び密度（2）

岩盤（平均火成岩組成）

（密度：2.6g/cm³）

元素	組成比 (wt%)	密度 (g/cm³)	原子個数密度 (atoms/b·cm)
H	1.29E-01	3.35E-03	2.00E-03
C	2.73E-02	7.10E-04	3.56E-05
O	4.69E+01	1.22E+00	4.59E-02
Na	2.85E+00	7.41E-02	1.94E-03
Mg	2.10E+00	5.46E-02	1.35E-03
Al	8.12E+00	2.11E-01	4.71E-03
Si	2.76E+01	7.18E-01	1.54E-02
P*1	1.31E-01	3.41E-03	6.62E-05
K	2.60E+00	6.76E-02	1.04E-03
Ca	3.63E+00	9.44E-02	1.42E-03
Ti	6.29E-01	1.64E-02	2.06E-04
Mn	9.29E-02	2.42E-03	2.65E-05
Fe	5.11E+00	1.33E-01	1.43E-03

（注1）出典：無機地球化学（培風館）
*1：DLC-23E ライブラリにないＰは計算上考慮しない。

緩衝材（ベントナイト：クニゲル V1）

（密度：2.13g/cm³）

元素	組成比 (wt%)	密度 (g/cm³)	原子個数密度 (atoms/b·cm)
H	1.75E+00	3.73E-02	2.23E-02
O	5.61E+01	1.20E+00	4.50E-02
Na	1.66E+00	3.53E-02	9.25E-04
Mg	1.17E+00	2.50E-02	6.19E-04
Al	6.76E+00	1.44E-01	3.22E-03
Si	2.95E+01	6.30E-01	1.35E-02
K	1.79E-01	3.82E-03	5.89E-05
Ca	1.31E+00	2.80E-02	4.20E-04
Fe	1.56E+00	3.33E-02	3.59E-04

（注1）クニゲル V1 の組成は、製品カタログ記載値。密度は、圧縮密度 1.8g/cm³（乾燥密度）、含水比 18.5%（飽和状態）として算出した。

7.3.1.2　計算結果

(1) ガンマ線源

フラックスの計算結果を表 7.3-5 に示す。表中の dpa については次の項で説明する。

(2) 中性子線源

各計算ケースの全フラックスを表 7.3-6 にまとめた。また、全フラックスが最大となる[岩盤＋銅有]のケースについて、そのフラックスのエネルギースペクトルを表 7.3-7 に示す。表中の dpa については次の項で説明する。

表 7.3-5　ガンマ線源のフラックス計算結果

上限ｴﾈﾙｷﾞｰ (MeV)	径方向		上方向		下方向	
	フラックス (γ/s/cm²)	dpa (1000年)	フラックス (γ/s/cm²)	dpa (1000年)	フラックス (γ/s/cm²)	dpa (1000年)
1.00E+01	2.18E+00	5.24E-13	2.14E+00	5.14E-13	2.14E+00	5.14E-13
8.00E+00	1.39E+01	2.18E-12	1.37E+01	2.15E-12	1.37E+01	2.15E-12
6.50E+00	8.17E+01	8.55E-12	8.10E+01	8.48E-12	8.10E+01	8.48E-12
5.00E+00	7.70E+01	4.76E-12	7.65E+01	4.73E-12	7.65E+01	4.73E-12
4.00E+00	3.26E+02	1.26E-11	3.26E+02	1.26E-11	3.26E+02	1.26E-11
3.00E+00	3.85E+02	7.82E-12	3.87E+02	7.85E-12	3.87E+02	7.85E-12
2.50E+00	1.04E+03	1.35E-11	1.05E+03	1.36E-11	1.05E+03	1.36E-11
2.00E+00	9.37E+06	6.40E-08	9.48E+06	6.47E-08	9.48E+06	6.47E-08
1.66E+00	1.26E+08	4.82E-07	1.28E+08	4.88E-07	1.28E+08	4.88E-07
1.33E+00	2.44E+08	4.02E-07	2.48E+08	4.08E-07	2.48E+08	4.08E-07
1.00E+00	2.83E+08	5.10E-08	2.87E+08	5.17E-08	2.87E+08	5.17E-08
8.00E-01	1.18E+10	1.27E-06	1.18E+10	1.27E-06	1.18E+10	1.27E-06
6.00E-01	2.17E+10	7.82E-07	2.21E+10	7.97E-07	2.21E+10	7.97E-07
4.00E-01	8.89E+09	0.00E+00	9.33E+09	0.00E+00	9.33E+09	0.00E+00
3.00E-01	1.54E+10	0.00E+00	1.62E+10	0.00E+00	1.62E+10	0.00E+00
2.00E-01	2.06E+10	0.00E+00	2.17E+10	0.00E+00	2.17E+10	0.00E+00
1.00E-01	2.20E+09	0.00E+00	2.27E+09	0.00E+00	2.27E+09	0.00E+00
5.00E-02	3.54E+08	0.00E+00	3.53E+08	0.00E+00	3.53E+08	0.00E+00
合計	8.15E+10	3.05E-06	8.43E+10	3.08E-06	8.43E+10	3.08E-06

表 7.3-6　中性子線源の各計算ケースにおける全フラックス計算結果

岩盤または緩衝材の選択	ｵｰﾊﾞｰﾊﾟｯｸの銅の有無	計算点	全フラックス（#/s/cm²）		dpa（1000年）		
			中性子	２次ガンマ線	中性子	２次ガンマ線	合計
岩盤	有	径方向	7.89E+04	1.07E+04	1.24E-06	5.93E-11	1.24E-06
		上方向	6.86E+04	9.48E+03	1.08E-06	4.89E-11	1.08E-06
		下方向	6.84E+04	9.45E+03	1.08E-06	4.84E-11	1.08E-06
緩衝材	有	径方向	7.54E+04	1.04E+04	1.19E-06	5.54E-11	1.19E-06
		上方向	6.72E+04	9.31E+03	1.06E-06	4.69E-11	1.06E-06
		下方向	6.66E+04	9.25E+03	1.05E-06	4.61E-11	1.05E-06
岩盤	無	径方向	7.63E+04	1.08E+04	1.20E-06	6.15E-11	1.20E-06
		上方向	6.75E+04	9.39E+03	1.07E-06	4.83E-11	1.07E-06
		下方向	6.68E+04	9.37E+03	1.05E-06	4.81E-11	1.05E-06
緩衝材	無	径方向	6.91E+04	1.01E+04	1.09E-06	5.44E-11	1.09E-06
		上方向	6.47E+04	9.06E+03	1.02E-06	4.46E-11	1.02E-06
		下方向	6.30E+04	8.97E+03	9.93E-07	4.37E-11	9.93E-07

表 7.3－7 (1)　中性子線源のフラックス計算結果*1 (1)

径方向					
中性子			2次ガンマ線		
上限ｴﾈﾙｷﾞｰ (MeV)	ﾌﾗｯｸｽ (n/s/cm²)	dpa (1000年)	上限ｴﾈﾙｷﾞｰ (MeV)	ﾌﾗｯｸｽ (γ/s/cm²)	dpa (1000年)
1.50E+01	0.00E+00		1.00E+01	3.04E+01	7.28E-12
1.22E+01	0.00E+00		8.00E+00	1.41E+02	2.20E-11
1.00E+01	0.00E+00		6.50E+00	8.37E+01	8.76E-12
8.18E+00	0.00E+00		5.00E+00	7.04E+01	4.35E-12
6.36E+00	0.00E+00		4.00E+00	1.39E+02	5.39E-12
4.96E+00	3.55E+02		3.00E+00	1.52E+02	3.09E-12
4.06E+00	2.91E+03		2.50E+00	2.09E+02	2.70E-12
3.01E+00	4.01E+03		2.00E+00	5.03E+02	3.44E-12
2.46E+00	1.31E+03		1.66E+00	2.92E+02	1.12E-12
2.35E+00	4.01E+03		1.33E+00	5.29E+02	8.70E-13
1.83E+00	6.56E+03		1.00E+00	4.60E+02	8.29E-14
1.11E+00	9.46E+03		8.00E-01	6.08E+02	6.58E-14
5.50E-01	2.63E+04		6.00E-01	2.33E+03	8.42E-14
1.11E-01	1.76E+04		4.00E-01	1.08E+03	0.00E+00
3.35E-03	4.18E+03		3.00E-01	1.76E+03	0.00E+00
5.83E-04	1.51E+03		2.00E-01	2.13E+03	0.00E+00
1.01E-04	3.93E+02		1.00E-01	1.54E+02	0.00E+00
2.90E-05	1.30E+02		5.00E-02	6.80E-01	0.00E+00
1.07E-05	7.01E+01		合計	1.07E+04	5.93E-11
3.06E-06	2.46E+01				
1.12E-06	9.08E+00				
4.14E-07	1.15E+00				
合計	7.89E+04	1.24E-06			

*1：表 7.3-6 から、全フラックスが最大となる[岩盤＋銅有]のケース

表 7.3－7 (2)　中性子線源のフラックス計算結果*1 (2)

上方向					
中性子			2次ガンマ線		
上限ｴﾈﾙｷﾞｰ (MeV)	ﾌﾗｯｸｽ (n/s/cm²)	dpa (1000年)	上限ｴﾈﾙｷﾞ (MeV)	ﾌﾗｯｸｽ (γ/s/cm²)	dpa (1000年)
1.50E+01	0.00E+00		1.00E+01	2.47E+01	5.93E-12
1.22E+01	0.00E+00		8.00E+00	1.10E+02	1.73E-11
1.00E+01	0.00E+00		6.50E+00	6.63E+01	6.93E-12
8.18E+00	0.00E+00		5.00E+00	5.58E+01	3.45E-12
6.36E+00	0.00E+00		4.00E+00	1.19E+02	4.62E-12
4.96E+00	3.52E+02		3.00E+00	1.38E+02	2.80E-12
4.06E+00	2.97E+03		2.50E+00	1.93E+02	2.50E-12
3.01E+00	3.99E+03		2.00E+00	4.85E+02	3.31E-12
2.46E+00	1.26E+03		1.66E+00	2.73E+02	1.04E-12
2.35E+00	3.94E+03		1.33E+00	4.90E+02	8.06E-13
1.83E+00	6.33E+03		1.00E+00	4.19E+02	7.57E-14
1.11E+00	8.59E+03		8.00E-01	5.53E+02	5.99E-14
5.50E-01	2.19E+04		6.00E-01	2.01E+03	7.24E-14
1.11E-01	1.42E+04		4.00E-01	9.55E+02	0.00E+00
3.35E-03	3.41E+03		3.00E-01	1.57E+03	0.00E+00
5.83E-04	1.22E+03		2.00E-01	1.89E+03	0.00E+00
1.01E-04	3.13E+02		1.00E-01	1.39E+02	0.00E+00
2.90E-05	1.03E+02		5.00E-02	6.20E-01	0.00E+00
1.07E-05	5.47E+01		合計	9.48E+03	4.89E-11
3.06E-06	1.87E+01				
1.12E-06	6.75E+00				
4.14E-07	9.25E-01				
合計	6.86E+04	1.08E-06			

*1：表 7.3-6 から、全フラックスが最大となる[岩盤＋銅有]のケース

表 7.3－7 (3)　中性子線源のフラックス計算結果*1 (3)

下方向					
中性子			2次ガンマ線		
上限ｴﾈﾙｷﾞｰ (MeV)	ﾌﾗｯｸｽ (n/s/cm²)	dpa (1000年)	上限ｴﾈﾙｷﾞｰ (MeV)	ﾌﾗｯｸｽ (γ/s/cm²)	dpa (1000年)
1.50E+01	0.00E+00		1.00E+01	2.44E+01	5.84E-12
1.22E+01	0.00E+00		8.00E+00	1.09E+02	1.70E-11
1.00E+01	0.00E+00		6.50E+00	6.54E+01	6.85E-12
8.18E+00	0.00E+00		5.00E+00	5.52E+01	3.41E-12
6.36E+00	0.00E+00		4.00E+00	1.19E+02	4.59E-12
4.96E+00	3.52E+02		3.00E+00	1.37E+02	2.79E-12
4.06E+00	2.97E+03		2.50E+00	1.93E+02	2.49E-12
3.01E+00	3.99E+03		2.00E+00	4.84E+02	3.31E-12
2.46E+00	1.26E+03		1.66E+00	2.73E+02	1.04E-12
2.35E+00	3.94E+03		1.33E+00	4.89E+02	8.06E-13
1.83E+00	6.33E+03		1.00E+00	4.19E+02	7.56E-14
1.11E+00	8.60E+03		8.00E-01	5.52E+02	5.98E-14
5.50E-01	2.18E+04		6.00E-01	1.99E+03	7.20E-14
1.11E-01	1.41E+04		4.00E-01	9.51E+02	0.00E+00
3.35E-03	3.38E+03		3.00E-01	1.56E+03	0.00E+00
5.83E-04	1.20E+03		2.00E-01	1.88E+03	0.00E+00
1.01E-04	3.02E+02		1.00E-01	1.38E+02	0.00E+00
2.90E-05	9.69E+01		5.00E-02	6.17E-01	0.00E+00
1.07E-05	5.02E+01		合計	9.45E+03	4.84E-11
3.06E-06	1.69E+01				
1.12E-06	6.00E+00				
4.14E-07	8.19E-01				
合計	6.84E+04	1.08E-06			

*1：表 7.3-6 から、全フラックスが最大となる[岩盤＋銅有]のケース

7.3.2　dpa 計算

7.3.2.1　ガンマ線

ガンマ線に対する鉄のはじき出し断面積は、ガンマ線のエネルギーの上昇とともに上昇することから、各エネルギー群のはじき出し断面積は、過小評価を避けるため、群の上限エネルギーに対応するはじき出し断面積として表 7.2-1 から内挿もしくは外挿することにより求めた。これを表 7.3-8 に示す。

先のフラックスと表 7.3-8 のはじき出し断面積から算出した炭素鋼の dpa は、表 7.3-5、7.3-7 中に既に示してある。ここで、放射線の照射時間は、オーバーパックによる核種の閉じ込め機能保持の目安である 1000 年[8]とした。表 7.3-5 ではガンマ線源からのガンマ線フラックス、表 7.3-7 では中性子線源から（n，γ）反応によって生じるガンマ線のフラックスと分けて示してあるが、後者は前者に比べ非常に小さく無視でき、炭素鋼が地層処分後 1000 年間でガンマ線により受ける dpa の最大値は、上方向あるいは下方向で 3.08E-06 dpa と見積もられる。

7.3.2.2　中性子

図 7.2-2 から中性子に対する鉄のはじき出し断面積は、中性子のエネルギーが 5E-04MeV 以上においてかなりバラツキがみられる。したがって、計算により求めた表 7.3-7 の中性子の平均エネルギーが約 1MeV となることから、このエネルギーに対応するはじき出し断面積約 500b を全てのエネルギー群のはじき出し断面積として適用し、照射時間を 1000 年として dpa を計算し、これを表 7.3-7 には示してある。表 7.3-7 から、炭素鋼が地層処分後 1000 年間で中性子により受ける dpa の最大値は、径方向で 1.24E-06 dpa と見積もられる。

以上により、炭素鋼が地層処分後 1000 年間でガンマ線と中性子により受ける dpa は、4.32E-06dpa 以下と見積もられる。ただし、これには 1000 年間におけるガラス固化体中の放射性核種の減衰、及び炭素鋼中でガンマ線によって生じる電子（陽電子）の減衰を考慮しておらず、実際にはこれよりずっと低い照射レベルであると考えられる。

表 7.3-8　DLC-23E 群構造に対応する鉄電子当たりのはじき出し断面積*1

上限ｴﾈﾙｷﾞｰ (MeV)	はじき出し断面積 (mb)
1.00E+01	292.30
8.00E+00	191.17
6.50E+00	127.64
5.00E+00	75.40
4.00E+00	47.24
3.00E+00	24.76
2.50E+00	15.75
2.00E+00	8.33
1.66E+00	4.66
1.33E+00	2.01
1.00E+00	0.22
8.00E-01	0.13
6.00E-01	0.04
4.00E-01	0.00
3.00E-01	0.00
2.00E-01	0.00
1.00E-01	0.00
5.00E-02	0.00

*1：　はじき出しのしきいエネルギーは 40eV とし、保守的に群の上限エネルギーに対応する値とした。

7.4　オーバーパックの炭素鋼の放射線損傷

炭素鋼（ASTM A212,A285,A537）について、照射レベルが 1.0E-05 から 1.0E-02 dpa の範囲における DBTT 変化を図 7.4-1[1]に示す。図中の PORTER と記されたプロットは、中性子フルエンス（E ＞ 1MeV）がおよそ 1.0E+17 から 1.0E+19 nvt（1.5E-04 から 1.5E-02 dpa に相当）の範囲における、多くの鋼の中性子照射データに関する傾向線[10]を表している。傾向線はそれらのデータの統計解析に基づいた DBTT 変化の平均値を表している。なお、それらのデータには 500° F（260℃）以下での中性子照射データという共通点はあるが、照射前の DBTT 値等の条件に特に共通点はなく、照射による鋼の DBTT 変化が dpa 以外の照射条件には敏感でないことを示唆するものである[10]。

傾向線は次の式で表される。

$$T_F = 31.084\left(\frac{\phi}{10^{17}}\right)^{\frac{1}{3}} + 2.087$$

$$\approx 31.084\left(\frac{\mathrm{dpa}}{1.5\times10^{-4}}\right)^{\frac{1}{3}} + 2.087$$

ここで、

T_F: DBTT変化（°F）

ϕ：中性子フルエンス（＞1MeV）（nvt）

また、図 7.4-1 からこの傾向線は下限として約 2.0E-05 dpa までは代表点として適用できると考えられる[1]。

オーバーパックの炭素鋼について、地層処分後 1000 年間における DBTT 変化を先の傾向線の外挿により推測した。炭素鋼は最大 3.42E-06 dpa の放射線照射を受けると先に見積もったが、これに対応する炭素鋼の DBTT 変化は 10.9° F（6.1℃）であり、dpa を非常に保守的に評価したことも考え合わせて、実際にはもっと小さく十分無視できるレベルであると推測される。したがって、オーバーパックの炭素鋼における機械的性質の変化も無視できるレベルであると推測される。

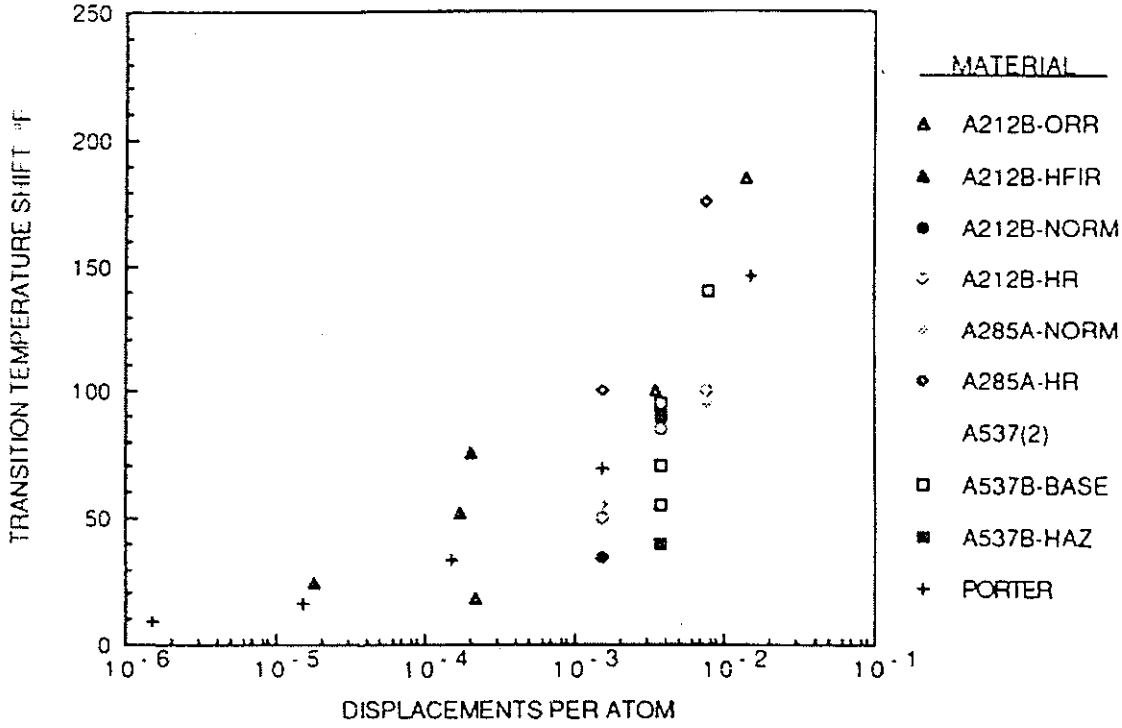


図 7.4-1　中性子放射線損傷によって引き起こされる DBTT 変化[1]

7.5 まとめ

オーバーパックの炭素鋼が、地層処分後 1000 年間にガラス固化体から放出される放射線により受ける損傷は最大で 4.32E-06 dpa と見積もられた。ただし、これには 1000 年間におけるガラス固化体中の放射性核種の減衰、及び炭素鋼中でガンマ線によって生じる電子（陽電子）の減衰を考慮しておらず、実際にはこれよりずっと低い照射レベルであると考えられる。

鋼についての多くの中性子照射データから統計解析によって導出された傾向線の外挿により、4.32E-06 dpa に対する炭素鋼の DBTT 変化は 6.1℃と算出された。これは dpa を非常に保守的に評価したことも考え合わせて、炭素鋼の DBTT 変化は実際にはもっと小さく十分無視できるレベルであると推測される。したがって、地層処分後 1000 年間にガラス固化体から放出される放射線が引き起こす、オーバーパックの炭素鋼における機械的性質の変化も無視できるレベルであると推測される。すなわち、本オーバーパックの設計（構造解析）に使用する炭素鋼の機械的性質に関する特性値について、地層処分後の放射線の影響はほとんど無視できると推測されることから、地層処分後の温度の影響のみを考慮すればよいと考えられる。

8．参考文献

（2．の参考文献）

1. SKB, "Assessment of A Spent Fuel Disposal Canister. Assessment Studies for A Copper Canister with Cast Steel Inner Component", SKB TECHNICAL REPORT 97-19, P 3-5, 1997
2. SKB, "Treatment and Final Disposal of Nuclear Waste", SKB RD & D Programme 95, P 73-92, 1995
3. SKB, "SKB ANNUAL REPORT 1996", SKB TECNICAL REPORT 96-25, P.63-76, 1997
4. SKB, "Production Methods and Costs of Oxygen Free Copper Containers for Nuclear Waste Disposal", SKB TECHNICAL REPORT 91-38, 1991
5. KSB, "Final Storage of Spent Fuel – KSB-3", 1983
6. SKB, "SKB ANNUAL REPORT 1991", SKB TECHNICAL REPORT 91-64, P 27-32, 1992
7. L.H. Johnson, D.W. Shoesmith, B.M. Ikeda and F. King, "Lifetimes of Titanium and Copper Containers for The Disposal of Used Nuclear Fuel", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 257, P 439-446, 1992
8. H.Y.S. Ko, L.J. Hosaluk, "Conceptual Design of Copper Metal-Matrix Fuel Waste Container", ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED TR-380, 1987
9. L.H. Johnson, J.C. Tait, D.W. Shoesmith, J.L. Crosthwaite and M.N. Gray, "The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: Engineered Barriers Alternatives", AECL-10718 COG-93-8, P 88, 1994
10. D.T. Peters, K.J.A. Kundig, D.F. Medley, P.A. Enders,"Multibarrier Copper-Base Containers for High-Level Waste Disposal", NUCLEAR TECHNOLOGY, Vol. 104, P 219-232, 1993
11. R. D. McCright, "An Annotated History of Container Candidate Material Selection", DOE rep. UCID-21472, 1988

（3．の参考文献）

1.「伸銅品データブック」，1-116 頁，日本伸銅協会，1997
2.「伸銅品データブック」，117-168 頁，日本伸銅協会，1997
3. 村上陽太郎，亀井清，「非鉄金属材料学」，1-52 頁，朝倉書店，1983
4.「伸銅品データブック」，253-285 頁，日本伸銅協会，1997
5.「資源エネルギー年鑑 1997/1998」，819 頁，840 頁，858 頁，通産資料調査会，1997
6.「銅 COPPER & BRASS」，No.147，10-11 頁，社団法人日本銅センター，1998

（4．の参考文献）

1. 動力炉・核燃料開発事業団：「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 TN 1410 92-081，(1992)
2. 安藤良夫，岡林邦夫，「原子力プラントの構造設計」，4-7 頁，東京大学出版会，1977

（5．の参考文献）
1.「鉄鋼製品の放射線試験方法」，114-120 頁，日本鉄鋼協会，1993
2.「人工バリアの信頼性向上及び高度化技術の研究（Ⅱ）」，動力炉・核燃料開発事業団 研究委託成果報告書，PNC ZJ1150-96-001，1996
3.「伸銅品データブック」，111 頁，日本伸銅協会，1997

（6．の参考文献）
1. 石川勇五郎 編著、「新版 非破壊検査工学」、238-283 頁、産報出版、1993
2. 石川勇五郎 編著、「新版 非破壊検査工学」、318-329 頁、産報出版、1993
3. L.H. Johnson, J.C. Tait, D.W. Shoesmith et al., "The Diposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: Engineered Barriers Alternatives", AECL-10718 COG-93-8, P101, 1994
4. "Characterization of Radioactive Waste Forms and Packages", IAEA Technical Reports Series №383, P.52-72, 1997
5. 関口晃、「放射線計測概論」、51-125 頁、東京大学出版会、1979
6. 財団法人高度情報科学技術研究機構、「原子力百科事典 ATOMICA」ホームページ (http://atomica.rist.or.jp/index.html) "放射性廃棄物中の核物質の測定技術"

（7．の参考文献）
1. G. R. Caskey, R. L. Sindelar, J. K. Thomas : "Potential for Radiation Damage to Carbon Steel Storage Tanks for High Level Radioactive Waste", NACE International Annual Conference(Corrosion'94), WSRC-MS-93-300, 1994
2. 日本金属学会：「原子力材料」，講座・現代の金属学 材料編８，1989
3. 石野 栞：「照射損傷」，原子力工学シリーズ８，東京大学出版会，1979
4. エネルギー特別研究（核融合）総合総括班：「核融合材料としてのフェライト系ステンレス鋼の適性」，昭和 60 年度 文部省科学研究費補助金 研究成果報告書，1986
5. "Standard Practice for Characterizing Neutron Exposures in Iron and Low Alloy Steels in Terms of Displacements Per Atom(DPA), E706(ID)", ASTM Designation E 693-94(reapproved 1985), Annual Book of ASTM Standards, Vol 12.02, 1992
6. N. P. Baumann, "Gamma Ray Irradiation Damage to SRP Reactor Tank Walls", DPST-88-781, 1988
7.「複合オーバーパックの設計研究」，動力炉・核燃料開発事業団 研究委託成果報告書，PNC ZJ1216-97-008, 1997
8.「人工バリアの信頼性向上及び高度化技術の研究（II）」，動力炉・核燃料開発事業団 研究委託成果報告書，PNC ZJ1150 96-001, 1996
9. 動力炉・核燃料開発事業団：「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 TN 1410 92-081, 1992
10. L. F. Porter : "Radiation Effects in Steel", ASTM Special Publication No.276, Materials in Nuclear Applications, American Society for Testing Materials, Philadelphia, Pa, P.163-174, 1960

参考資料１

「氷河作用」について

「２．海外における検討事例調査　2.1 スウェーデン」の項目にある「氷河作用」（glaciation）は氷河期と間氷期が繰り返し起こることによる影響を意味している。2 章の参考文献(5)に記述された「氷河作用」の概要を以下に示す。

１．　氷河期に入ると、現在の地表に厚さ数 km のアイスキャップ（ice cap）ができる。

- この重みによって岩盤に荷重が加えられることが考えられる。
- アイスキャップによって地表が覆われることにより水の侵入が阻止され、地下水は減少し、結果的にキャニスターの腐食を緩和しキャニスターの寿命が伸びると予想される。
- このような氷河期は数万年から数十万年続くと考えられる。

２．　氷河期の終わりにはアイスキャップが溶け出す。

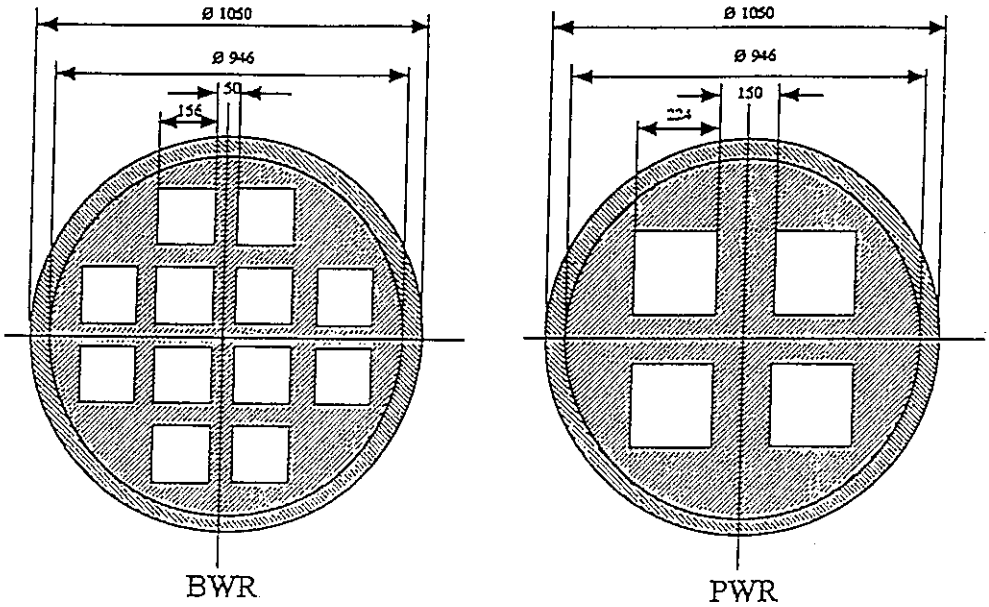
- アイスキャップの溶解により局所的に大きな静水圧と地下水の流入がもたらされる。
- この水により地質及び地形に変化をもたらすと考えられる。
- スウェーデンのような平坦な地形では、このようなアイスキャップの溶解によって引き起こされる浸食は大きくても数十 m と考えられている。

３．　現在のエスカ（氷河期の影響によりできた地層）を調査した結果、氷河作用により地質に変化が起こるのは表面付近の地層であり、地下数百 m では実質的に地質に関する変化はないとしている。

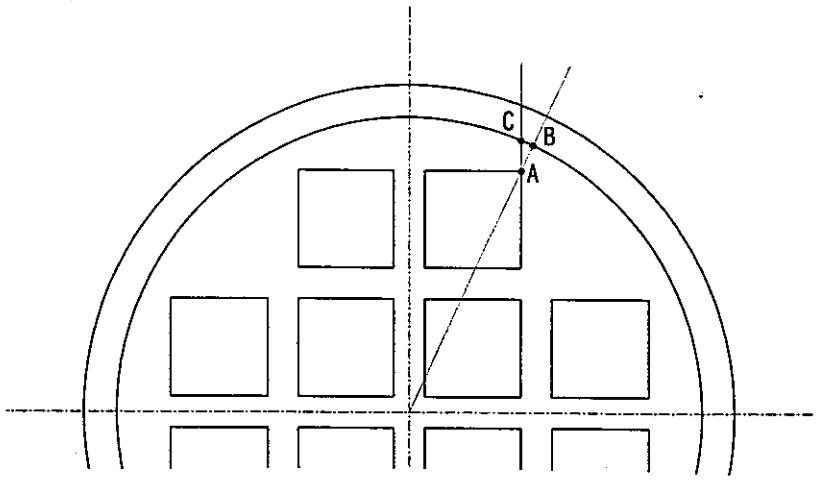
参考資料２

SKB 処分容器の概念設計に関する補足

「２．海外における検討事例調査　2.1 スウェーデン　2.1.2 銅製処分容器の概要　(1) 処分容器概念図」の項目において、「インサート外周からチャンネルボックスまでの距離は最短で 50mm」という記述は、2 章の参考文献(2)から引用したものである。この表現からは、図－参１の線分 AB が 50mm 以上と読み取れるが、その後公開された参考文献(1)に掲載された BWR 燃料用インサートの図(図－参２)では、線分 AC が 50mm となっている。同じ参考文献(1)に掲載された PWR 燃料用インサートの図では、線分 AB に当る長さが 50mm となっている。(図－参２参照)



図－参１　参考文献１に記載された BWR 及び PWR 燃料用インサートの形状



図－参２　インサート外周からチャンネルまでの距離の設定位置