

オーバーパック溶接部の設計手法に関する研究 —溶接品質定量化のための基礎データの取得—

(核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書)

—研究概要—

2000年2月

三菱重工業株式会社

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2000

2000年2月

オーバーパック溶接部の設計手法に関する研究 －溶接品質定量化のための基礎データの取得－

柳澤 一郎^{*1}、重 隆司^{*2}、加口 仁^{*3}、富松 実^{*4}
佐郷 ひろみ^{*3}、内藤 大靖^{*3}、中村 和博^{*5}

要 旨

本研究では、溶接部の設計手法について見通しを得ることを目的に、溶接部の基礎データを取得し、これを用いた破壊予測解析等を実施した。各項目の成果は下記の通りである。

1) 供試体の設計および溶接施工条件の検討

溶接方法として電子ビーム溶接、TIG溶接、MAG溶接を選定し、溶接部の品質が実オーバーパックと同等となるよう溶接条件を検討した。

2) 供試体の製作

電子ビーム溶接とTIG溶接、MAG溶接の供試体3体を製作し、溶接部の品質がJIS Z 3104 1類以上であることを確認した。

3) 強度試験片等の採取・加工

溶接後の各供試体から試験片を採取し、腐食試験用試験体をサイクル機構殿へ納入した。

4) 強度試験および組織観察

引張試験は室温と150°C、破壊靭性試験は0°Cと150°Cで実施し、応力ひずみ曲線とJ-R曲線、ピッカース硬度などを取得すると共に、ミクロ組織、マクロ組織を観察した。

5) 評価

試験結果から得られた溶接部データを用い、「第2次とりまとめレポート」のオーバーパック構造を対象に、破壊予想解析ならびに溶接欠陥による不安定破壊の評価を実施し、下記の結論を得た。

- ・評価対象としたオーバーパック構造では、破壊荷重に対する溶接部の影響（材料特性、残留応力）ならびに製作公差の影響は無視できる。
- ・さらに板厚を減じた設計でも、崩壊が胴中央部から生じるため、破壊荷重への溶接部の影響は少ないと判断された。
- ・不安定破壊に至る欠陥寸法は10mm程度となり、現状の非破壊検査で検出可能なレベルである。この結論は、板厚を減じた設計でも同様と考えられる。

本報告書は、三菱重工業株式会社が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究成果に関するものである。

契約番号：110D0154

機構担当部課室：東海事業所 環境保全・研究センター 処分研究部

処分バリア性能研究グループ 本間 信之

*1 三菱重工業株式会社 原子力プラント技術部 バンクエンド技術課

*2 三菱重工業株式会社 高砂研究所 製造技術開発センター

*3 三菱重工業株式会社 原子力プラント技術部 新型炉プラント技術課

*4 三菱重工業株式会社 高砂研究所 材料強度研究室

*5 三菱重工業株式会社 高砂研究所 構造研究室

Feb. 2000

A STUDY ON DESIGN METHODS FOR OVERPACK WELDS

- Acquisition of basic data to quantify welding quality -

Ichiro Yanagisawa^{*1}, Takashi Shige^{*2}, Hitoshi Kaguchi^{*3}, Minoru Tomimatsu^{*4}, Hiromi Sagou^{*3}, Taisei Naito^{*3}, Kazuhiro Nakamura^{*5}

ABSTRACT

In this study basic data on welds of overpack structures for HLW were acquired and a predictive destruction analysis was performed using the data acquired, in order to examine the viability of weld design methods. The results are summarized as follows:

1) Investigation of Design and Welding Conditions for Welded Joint Models

Three welding methods--EBW, TIG and MAG--were selected, and welding conditions were determined so that the welding quality almost equivalent to that of an actual over-pack was ensured.

2) Fabrication of Welded Joint Models

Three welded joint models, one for each of EBW, TIG and MAG, were fabricated. It was confirmed that these models satisfied the quality requirements for Class I specified in JIS Z3104.

3) Sampling and Machining of Strength Test Specimens

Test specimens were taken from each welded joint model, and models for corrosion tests were delivered to the Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC).

4) Strength Test and Micro/macro Structure Observation

Tensile tests were conducted at room temperature and at 150°C, and fracture toughness tests at 0°C and 150°C, in order to obtain stress-strain curves, J-R curves and Vickers hardness. In addition, an observation of micro and macro structures was performed.

5) Evaluation

Using the data on the welds obtained from the tests, a fracture prediction analysis and an evaluation of unstable fracture due to weld flaws were performed on the over-pack design described in the second progress report. The following conclusions were obtained:

- For the overpack design examined, the effects of welds (material property and residual stress) and fabrication tolerance on fracture loading are negligible.
- In addition, it was decided that even in a design with reduced wall thickness, welds have an insignificant effect on fracture loading because fracture initiates in the center of the shell of the overpack.
- The size of flaws leading to unstable fracture is on the order of 10 mm and can be detected by current non-destructive test techniques. These conclusions appear to be applicable to a design with reduced wall thickness.

This work was performed by Mitsubishi Heavy Industries (MHI), Ltd. under the contract with the Japan Nuclear Cycle Development Institute.

Contract No.: 110D0154

JNC Liaison: Nobuyuki Honma, Barrier Performance Group, Waste Isolation Research Division, Disposal Environmental Conservation and Research Center, Tokai Office

*1 Back-End Engineering Section, MHI Nuclear Plant Engineering Department

*2 Manufacturing Technology Center, MHI Takasago Research & Development Center

*3 Advanced Nuclear Plant Engineering Section, MHI Nuclear Plant Engineering Department

*4 Materials & Strength Laboratory, MHI Takasago Research & Development Center

*5 Structure Laboratory, MHI Takasago Research & Development Center

目 次

1.はじめに	1
2.供試体の設計および溶接施工条件の検討	2
2.1 供試体の設計	2
2.2 溶接施工条件の検討	2
3.供試体の製作	4
3.1 供試材	4
3.2 溶接試験板の形状	4
3.3 供試体の溶接	4
3.4 溶接継手の非破壊検査	4
4.強度試験片等の採取・加工	6
5.強度および組織観察	7
5.1 引張試験	7
5.2 破壊靭性試験	7
5.3 硬さ試験	8
5.4 組織観察	8
6.評価	13
6.1 溶接部の引っ張り特性を考慮したオーバーパックの破壊予測解析	13
6.2 溶接欠陥の影響評価	20
6.3 評価のまとめ	21
7.おわりに	23
8.謝辞	24

図表リスト

表 3.3-1	溶接施工条件	5
表 5.2-1	破壊靭性試験数	7
表 5.2-2	破壊靭性試験結果	11
表 6.1.4-1	2次元解析ケース	17
表 6.1.6-1	2次元解析崩壊荷重評価結果一覧表	17
表 6.1.8-1	3次元解析崩壊荷重評価結果一覧表	18
表 6.2.2-1	応力拡大係数算出に用いた応力	22
表 6.2.2-2	破壊靭性値に対する限界き裂深さ	22
図 2.1-1	溶接試験板の形状	3
図 5.1-1	応力-ひずみ線図（室温）	9
図 5.1-2	応力-ひずみ線図（150°C）	10
図 5.2-1	J-R曲線	12
図 5.2-2	KJと試験温度の関係	12
図 6.1.8-1	3次元解析変形状態【外圧：100MPa】	19

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構殿（以下、「サイクル機構殿」という。）では、原子力委員会の方針に従い高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の第2次技術報告書を1999年11月に提出しており、オーバーパックについては、平成3年度の第1次技術報告書の提出以降、新たに得られた知見をもとに、設計の考え方、設計条件の見直しが遂次行われ、上記第2次技術報告書では約30%の板厚削減が図られている。

オーバーパックは製作数が膨大となることから、処分事業に与える経済的な影響を考慮すれば過渡に保守的な設計は望ましくない。今後のオーバーパック構造の最適化に向けては、まず、構造を決定するうえで最も基本となる強度設計に関し、これまでの既存の規格計算式を用いた板厚設定を再検討し、設計手法合理化の可能性についてある程度の見通しを得ておくことが必要である。このことは第2次取りまとめ以降のオーバーパック研究開発の方向性を明らかにするという意味において重要である。

昨年度は、静的な外圧によるオーバーパックの崩壊挙動を、詳細なFEM解析によって予測するとともに、縮尺モデルを用いた耐圧試験を通じて解析結果の妥当性を確認し、オーバーパックの過大な変形（全体的な崩壊）を防止するための応力評価方針を示した。本年度は、構造不連続部、特に溶接部が構造の健全性に及ぼす影響（局所ひずみや溶接欠陥）の設計的な取り扱いについての見通しを得ることを目的に、溶接部の強度特性等に関する基礎データを取得し、これを用いた破損予測解析等を実施する。

2. 供試体の設計および溶接施工条件の検討

2.1 供試体の設計

供試体の溶接長は所定の試験片を採取できるように 900mm、板幅は拘束ジグに固定できるように 400mm、板厚は溶接部の冷却速度がオーバーパックのような大型構造物とほぼ同等になるように溶接部の厚さが 50mm を確保できるようにした。溶接方法としては、オーバーパックは遠隔操作で溶接されるので、多層溶接には溶接口ボットに多用され遠隔操作の実績がある溶接方法として MAG 溶接と TIG 溶接を採用する。溶接継手形状はオーバーパック封入部と同様の溶接継手にするため、電子ビーム溶接用としては I 形開先を、多層溶接用としては溶接欠陥の防止に有利な U 形開先を採用した。U 形開先の場合、開先幅は溶接量そのものに影響するため溶接能率の点からは狭いほうが望ましく、溶接トーチが開先内に入る最小の幅にした。図 2.1-1 に、設計した供試体寸法を示す。

2.2 溶接施工条件の検討

- ・電子ビーム溶接は 1 パスで深溶込みの溶接が可能であるが、厚肉になると溶接金属が溶け落ちるのでこれを防止するために横向き姿勢の溶接を採用するのが一般的である。今回も安定した溶接をおこなうために溶接姿勢は横向きとする。
- ・多層溶接においては溶加材より若干の水素が溶接部に入ることがあり、拘束の強い場合には低温割れを生じる可能性がある。これを防止するために 100°C の予熱を実施する。ただし、電子ビーム溶接では溶加材を使用せず真空中で溶接することから、低温割れの原因になる水素がないことから、予熱なしでも溶接が可能である。このため電子ビーム溶接では予熱は行なわないこととする。

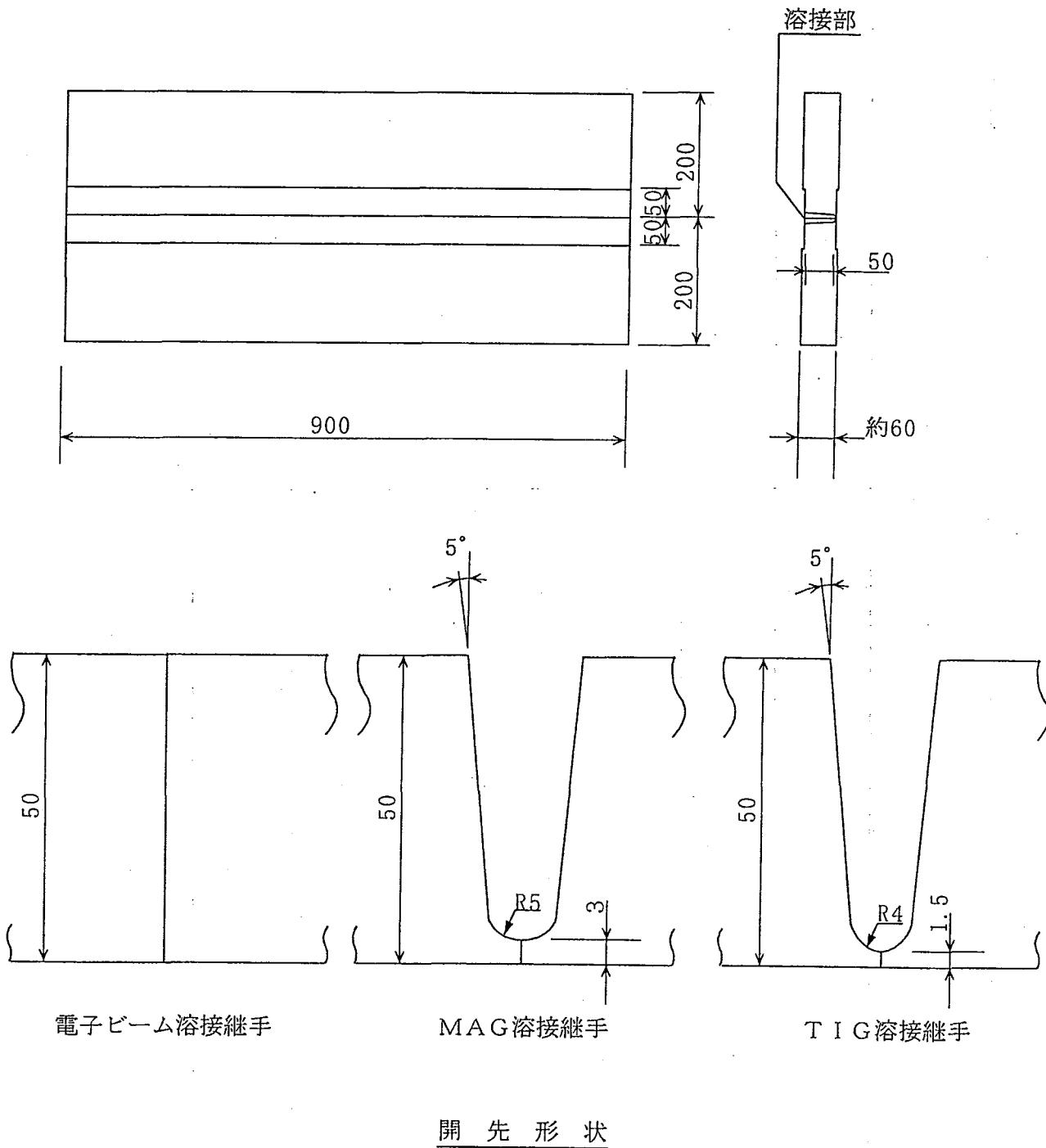


図 2.1-1 溶接試験板の形状

3. 供試体の製作

3.1 供試材

母材は板厚約 60mm の圧力容器用炭素鋼鍛鋼板、SFVC1 を、溶接材料にはM A G溶接材料としてMGS50、T I G溶接材料としてTGS50を用いた。

3.2 溶接試験板の形状

供試母材は約 60mm の板厚であるが肉厚の薄い箇所もあるため溶接部近傍 100mm の範囲は板厚 50mm に減肉して開先加工を実施した。電子ビーム溶接継手は I 型開先とし、M A G溶接継手とT I G溶接継手にはU型開先とした。M A G溶接では溶込みが深くなるため、初層溶接時の溶接金属の溶け落ちを防止する必要があり、ルート部(突合せ部)の厚さをT I G溶接継手のルート部より厚くした。

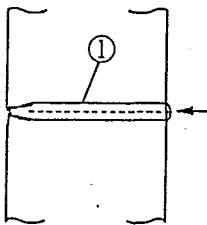
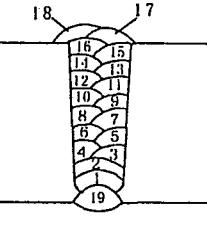
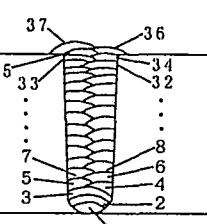
3.3 供試体の溶接

電子ビーム溶接は溶接金属の溶け落ちを防止するため横向水平溶接を実施した。M A G溶接とT I G溶接は下向姿勢で溶接し、融合不良を防止するため1層2バスの振り分け溶接を実施した。各溶接施工条件を表 3.3-1 に示す。

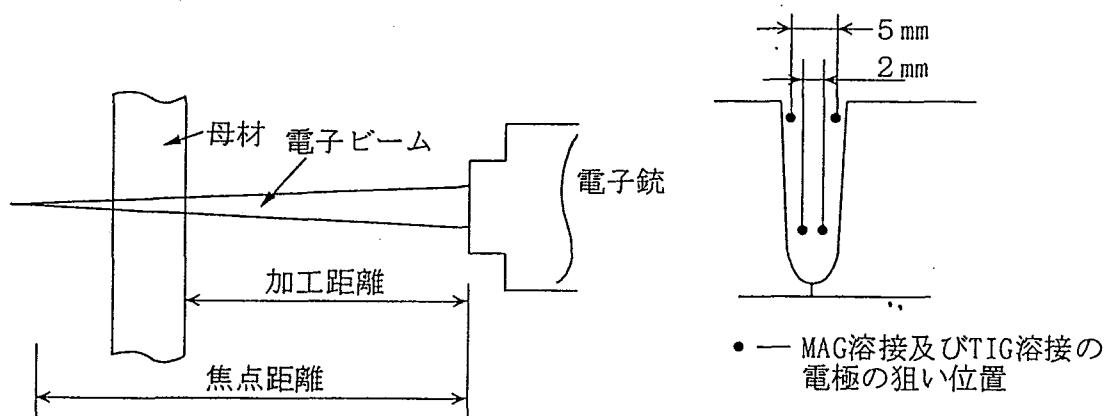
3.4 溶接継手の非破壊検査

各溶接継手に対して表面検査として浸透探傷試験を、また、体積検査として放射線透過試験を実施し、いずれも良好な溶接結果が得られた。

表 3.3-1 溶接施工条件

溶接方法	積層 (数字, パスNo.)	溶接姿勢	溶接 [°] No.	溶接電流(A)	溶接電圧(V)	溶接速度(mm/min)	シールドガス	溶加材	焦点 [*] 距離(mm)	加工 [*] 距離(mm)	予熱(℃)
電子ビーム		横向き	1	300×10^{-3}	90×10^3	250	真空 $[1 \times 10^{-4} \text{ torr}]$	なし	550	400	予熱なし
MAG		下向き	1 2 3 4 5~6 7~12 13~19	140 220 230 230 240 250 260	23 30 31 28 28 29 30	250 250 260 260 260 250 250	Ar + CO ₂ (20%)	MGS 50	—	—	100
TIG		下向き	1 2 3 4~6 7~8 9~11 12~35 36~37	150 220 250 220 230 240 250 220	9 10 11 10 10 11 11 10	80 80 80 80 80 80 80 80	Ar	TGS 50	—	—	100

※ 焦点距離, 加工距離



4. 強度試験片等の採取、加工

溶接及び非破壊検査の終了した供試体より各試験片を採取したが、母材試験片は電子ビーム溶接継手供試体より採取した。さらに、腐食試験用供試体をサイクル機構殿に送付した。

5. 強度及び組織観察

5.1 引張試験

母材及び溶接継手（溶接金属）の引張試験を室温と150°Cで実施し、解析用応力一ひずみ線図と引張特性を求めた。溶接金属の引張強度は電子ビーム溶接金属が最も強く、MAG溶接金属、TIG溶接金属の順で低くなる傾向があるが、いずれも母材を上回っていた。（表5.1-1、表5.1-2）

5.2 破壊靶性試験

CT試験片を使用し、ASTM E1737-96に準拠した方法に従った破壊靶性試験を実施し、J積分抵抗曲線（J-R曲線あるいはJ-Δa曲線）を取得する。表5.2-1に試験マトリクスを示す。

表5.2-1 破壊靶性試験数

対象部位	試験温度	
	0°C	150°C
母材	1	1
溶接継手	電子ビーム溶接継手	WM : 1 / HAZ : 1
	MAG溶接継手	WM : 1 / HAZ : 1
	TIG溶接継手	WM : 1 / HAZ : 1

（注）WM：溶着金属、HAZ：溶接熱影響部

5.2.1 試験方法及び試験結果

1TCT試験片の切欠先端には予め低い荷重を繰返し与え、疲労き裂を導入した。破壊靶性試験は、ASTM E1737-96に準じて試験を行った。試験温度は表5.2-1に示したように0°Cおよび150°Cで実施した。

破壊靶性試験結果を表5.2-2に示す。150°Cでは、7種類の材料（母材及び電子ビーム溶接継手・MAG溶接継手・TIG溶接継手の溶着金属と熱影響部）とも全てに延性き裂の成長が認められ、J-R曲線を測定した（図5.2-1）。これに対して、0°Cでは母材・電子ビーム溶接継手の溶着金属・全溶接継手の熱影響部で、脆性不安定破壊が生じた。測定したJ_{IC}あるいはJ_Q（脆性不安定破壊を起こした場合には、不安定破壊点でのJ積分の値J_Q）から、等価の破壊靶性K_{IC(J)}を次式に従って算出し、試験温度との関係を図5.2-2に示す。なお延性き裂の成長が生じている場合には、この値は安全サイドの値となる。

$$K_{IC(J)} = \sqrt{E J_{IC}} / (1 - \nu^2) \text{ or } \sqrt{E J_Q} / (1 - \nu^2) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

150°Cでは7種類の材料のうち、MAG溶接継手・TIG溶接継手の溶着金属のK_{IC(J)}が高く、他

の材料はほぼ同等である。一方、0°Cにおいては電子ビーム溶接継手の溶着金属が多少低い値を示す傾向にあるが、今回の試験においては $100\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以上の値が得られている。

5.3 硬さ試験

溶接金属は電子ビーム溶接部が最も硬く Hv240 程度、次いで MAG 溶接部が Hv210 程度、TIG 溶接部が Hv190 程度である。溶接熱影響部の最高硬さは電子ビーム溶接と MAG 溶接部が Hv250 前後、TIG 溶接部は Hv210 程度と低くなっていた。

5.4 組織観察

母材はフェライトとパーライトの混合組織であった。電子ビーム溶接部は結晶粒が大きく、溶接金属はマルテンサイト、ベイナイトと一部にフェライトを含む混合組織であり、熱影響部もほぼ同様の組織であった。MAG 溶接部は電子ビーム溶接部より組織は細かく、TIG 溶接部は溶接金属、熱影響部ともに微細組織になっていた。

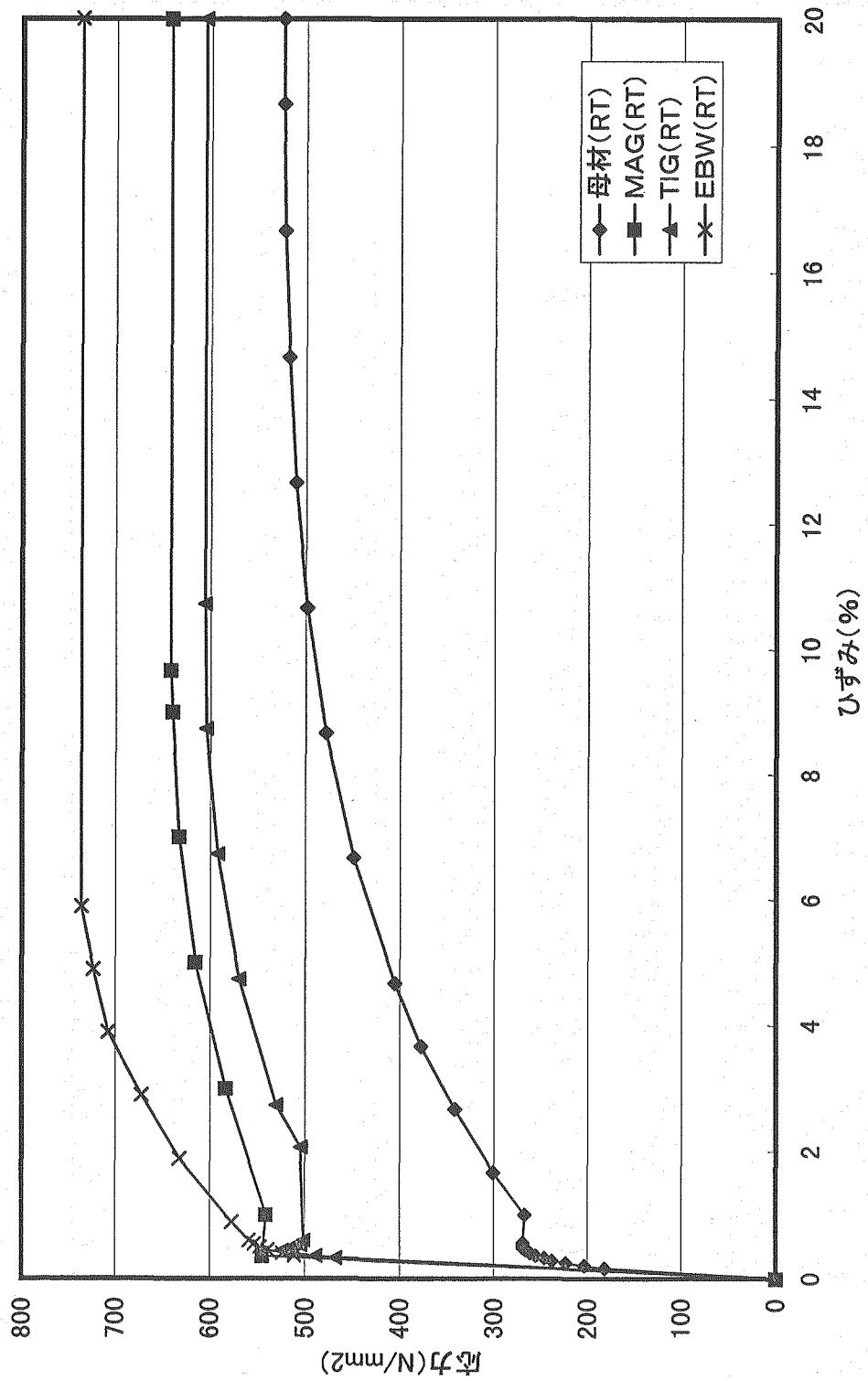


図5.1-1 応力一ひずみ線図（室温）

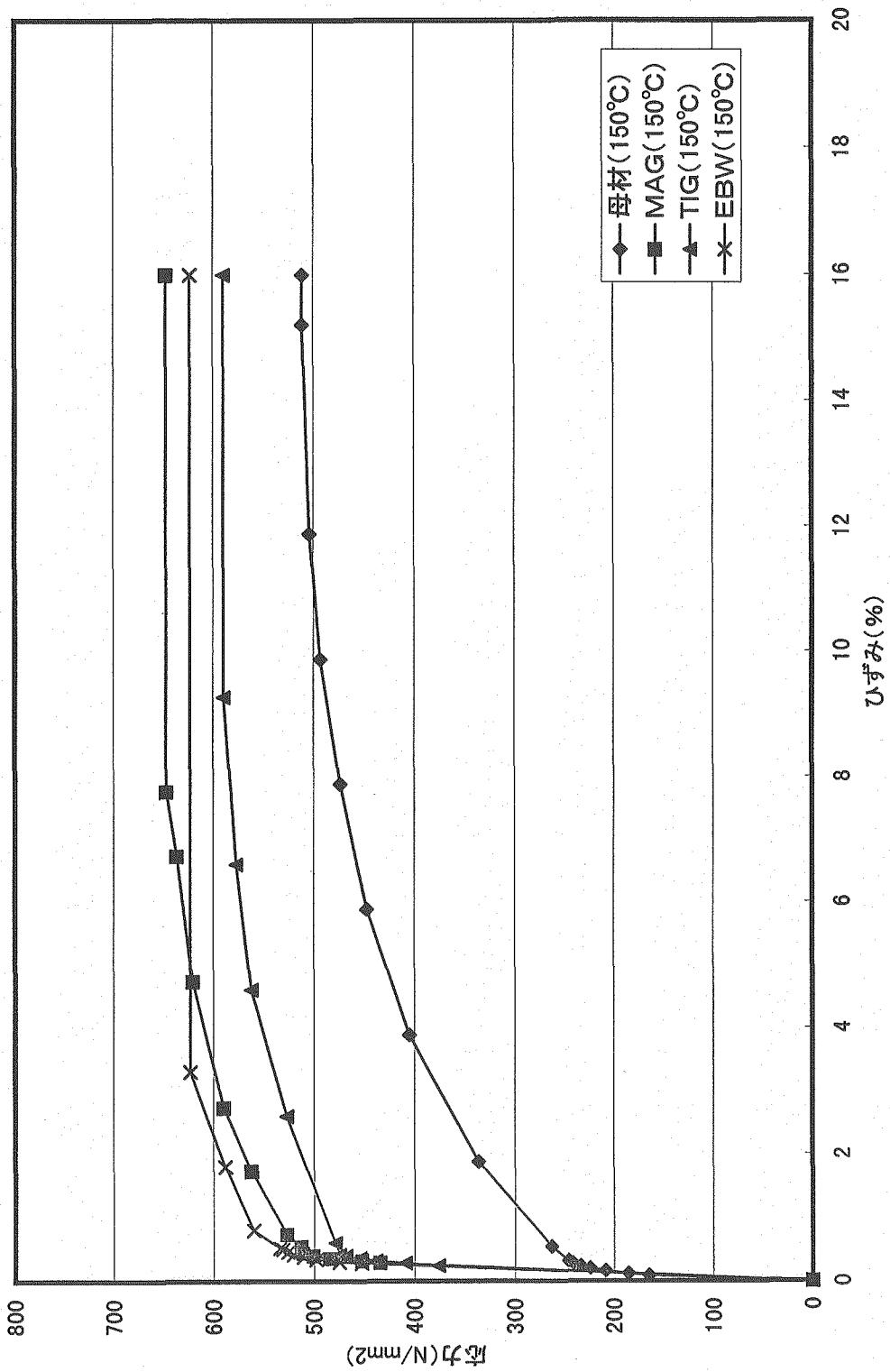


図5. 1—2 応力—ひずみ線図 (150°C)

表5.2-2 破壊革性試験結果

対象 部位	温度 T (°C)	試験片形状 (mm)			P _Q (kN)	P _{Max} (kN)	K _{Ic} (MPa \sqrt{m})	J _c (kJ/m ²)	注2) J _{Ic} (kJ/m ²)	K _{Ic(J)} (MPa \sqrt{m})	備考
		厚さ B	幅 W	SG底厚さ Bn a							
SFVC1 母材	0	50.0	25.0	20.0	27.3	20.6	35.2	(46.3)	141	-	179
	150	50.0	25.0	20.0	27.1	-	35.9	-	-	123	163
電子ビーム 溶着金属	0	50.0	25.0	20.0	26.3	27.0	35.0	(56.9)	46	-	102
	150	50.0	25.0	20.0	26.3	-	50.0	-	-	116	158
溶接継手 熱影響部	0	50.0	25.0	20.0	26.4	29.6	51.9	(62.4)	199	-	212
	150	50.0	25.0	20.0	26.8	-	47.3	-	-	119	160
溶接継手 熱影響部	0	50.0	25.0	20.0	26.4	-	67.2	-	-	378	293
	150	50.0	25.0	20.0	26.5	-	59.4	-	-	217	216
MAG 溶接継手 熱影響部	0	50.0	25.0	20.0	26.7	30.4	51.5	(65.2)	246	-	236
	150	50.0	25.0	20.0	26.9	-	47.2	-	-	123	163
TIG 溶接継手 熱影響部	0	50.0	25.0	20.0	26.9	-	64.6	-	-	(878)	446
	150	50.0	25.0	20.0	26.5	-	63.9	-	-	381	286
	0	50.0	25.0	20.0	26.8	29.1	49.1	(63.1)	119	-	164
	150	50.0	25.0	20.0	26.8	-	47.5	-	-	127	165

注1) ()はASTM E399のvalid条件を満足しないK_Q値注2) ()はASTM E1737のvalid条件を満足しないJ_Q値

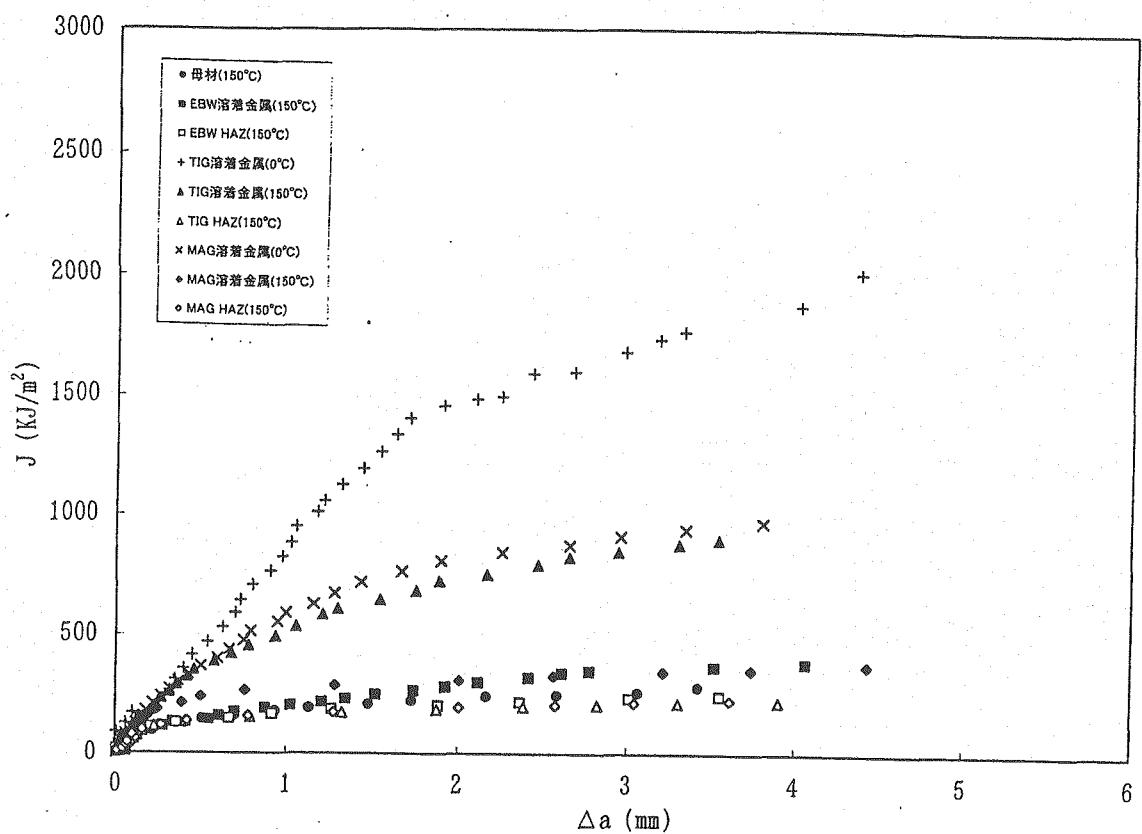


図 5.2-1 J-R曲線

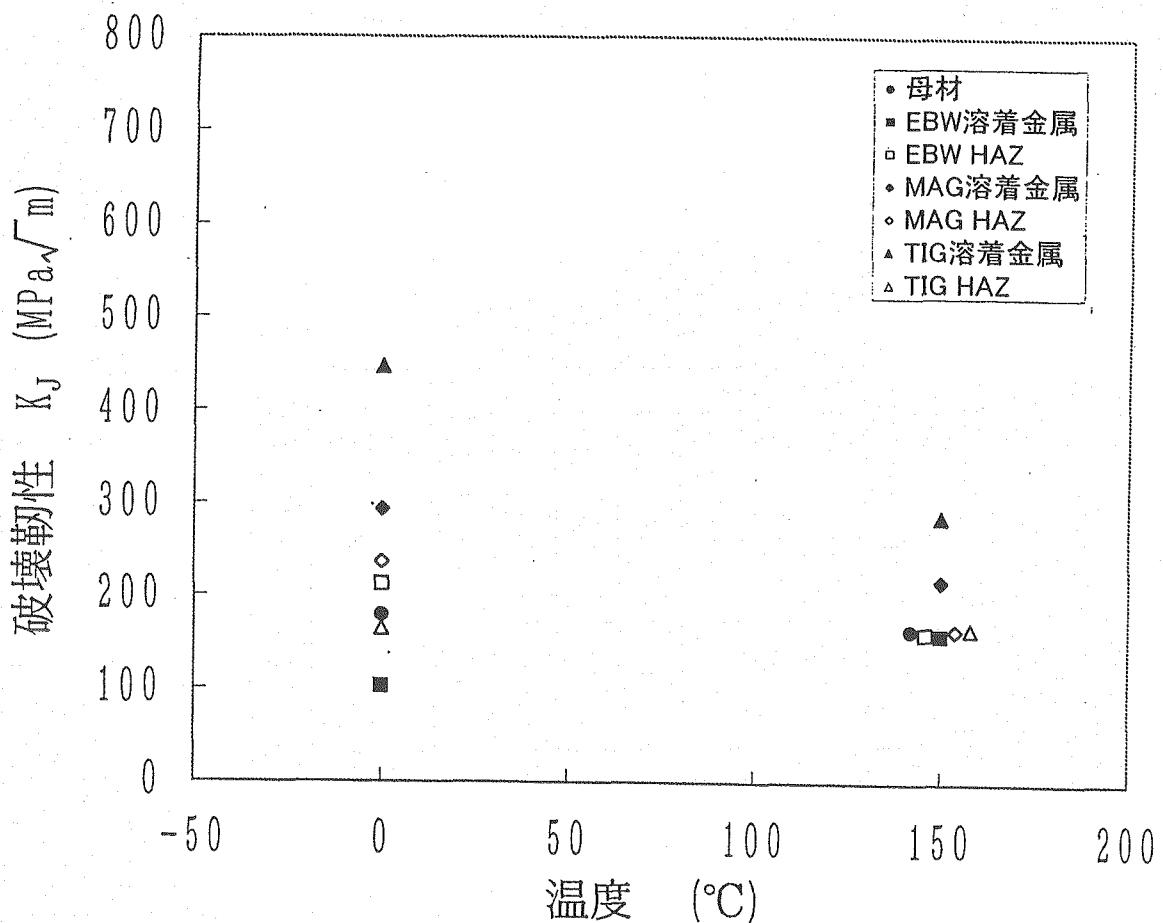


図 5.2-2 K_J と試験温度の関係

6. 評価

6.1 溶接部の引張特性を考慮したオーバーパックの破壊予測解析

6.1.1 概要

外圧によるオーバーパックの破壊荷重及び不安定破壊に対するき裂のクライテリアを評価するために、5項に示す母材及び溶接部の材料特性を反映したオーバーパックのFEM解析を実施し、外圧による破壊に対する裕度を確認した。また、溶接部の残留応力も考慮し、その影響を把握した。

6.1.2 2次元軸対称解析モデル

「第2次とりまとめ」及び電子ビーム溶接、MAG溶接及びTIG溶接を用いて実施した溶接部強度試験結果とオーバーパックの設計例（動力炉・核燃料開発事業団殿 委託業務 超長期耐食性複合容器の製作 蓋製作図（J8-00AG009R2）に基づき解析に用いる2次元軸対称モデルを作成し、解析に用いた。

6.1.3 残留応力の推定

残留応力が溶融金属の熱収縮に起因することを考慮し、解析上の残留応力を与えるため溶接部の線膨張係数及び温度を適切に設定し、母材部に対して溶接部の温度を低くすることにより熱ひずみを与える、発生する熱応力により残留応力を模擬するものとした。

残留応力は溶接手法によって異なり、1パスで施工する電子ビーム溶接では溶接部全体が一様に収縮し、多層盛溶接では初期の溶接バス部と終盤の溶接バス部で開先形状の変化などにより収縮の仕方が変化する。よって、電子ビーム溶接では母材と溶接部に一様の温度差を与える、多層盛溶接では初期の溶接バス部から終盤の溶接バス部にかけて変化させた温度差を与えた。

具体的には、EBW溶接については溶接金属部に相当する部分に周辺に比べて1500°Cの温度差を与えることとし、TIG溶接については溶接金属部に相当する部分に与える周辺との温度差を線形的に変化させ、深い側で1500°C、表面付近で950°Cとした。

6.1.4 破壊予測解析ケース

溶接部の材料特性が設計荷重における応力状態や破壊荷重に与える影響を把握するため、2次元軸対称モデルにより解析を実施した。解析は表6.1.4-1に示す7ケースを対象として設計荷重における応力状態を確認するための弾性解析及び破壊荷重を予測するための崩壊解析（弾塑性大変形解析）を実施する。

ケース1については、蓋と胴の溶接部近傍のスリット幅が大きい点で構造的に厳しいと考えられるTIG溶接部をモデル化した解析モデルを用いることとした。

MAG溶接部モデル化したケース4、5の崩壊解析については、次項に示す理由により実施しないこととした。

6.1.5 弹性解析

オーバーパックの設計荷重である外圧 15.3 MPa を負荷する弾性解析をケース 1, 2, 4, 6について実施した。以下に弾性解析結果の傾向及び評価を示す。

- ・近傍に溶接部のない断面に発生している応力についてはいずれのケースも同等である。
- ・ケース 1, 6 は同一のモデルを使用していること、弾性解析であるため溶接部と母材部の物性値の差が Young 率だけであることにより、溶接部近傍の断面に発生している応力はほぼ同等である。
- ・M A G 溶接部をモデル化したケース 4 と T I G 溶接部をモデル化したケース 6 を比較すると、溶接部近傍の断面に発生している応力は材料物性の差に起因して若干の差があるものの、ほぼ同等である。
- ・E B W 溶接部をモデル化したケース 2 では、蓋と胴の接触部スリットの幅が小さいため、他のケースに比べ応力が小さめである。

弾性解析の結果、ケース 1 の母材一様の場合に比べて溶接部の物性値の差や若干のモデル形状の差に起因して発生応力が多少異なる結果が得られているが、これらの差異は全体の破壊に寄与するほどのものではないと予測される。

また、ケース 4 とケース 6 で解析結果にほとんど差がなく、一方の結果より他方の結果が予測できると考えられるため、残留応力の検討及び崩壊解析については M A G 溶接部をモデル化したケースは T I G 溶接部モデルにて代表させることとした。

6.1.6 崩壊解析

オーバーパックの破壊荷重を予測するために崩壊解析を実施する。崩壊解析とは、大変形を考慮した弾塑性解析によって行い、荷重を徐々に増加することにより構造に塑性変形を生じさせ、大きく変形させる解析である。

破壊荷重（崩壊荷重）については、以下に示す 3 種類の方法で設定し、その差異を検討する。

- ① 荷重とそれによる変形量の関係直線を求めて、その直線部の荷重軸に対する 2 倍の勾配の直線が、荷重と変位量との関係直線と交わる点に相当する荷重（倍角法）
- ② 評価断面の各部位の Mises 相当応力が降伏応力を越えた荷重
- ③ 局所で発生する相当塑性ひずみが 5 % を越える荷重（出典：ASME section III Division 1 Subsection NH, Class 1 Components in Elevated Temperature Service）

崩壊解析では、上記の崩壊荷重の評価を行うため、外圧荷重と変位、ミーゼス相当応力及び塑性ひずみとの関係を表した履歴データを取得しており、各ケースの履歴データから崩壊荷重を求めた結果を表 6.1.6-1 に示す。

以下に崩壊解析結果の傾向及び評価を示す。

- ・いずれのケースも評価法①（倍角法）で求めた場合、胴中央部の崩壊荷重が最も小さく、約 130 MPa である。

- ・いずれの評価法でも胴中央部の崩壊荷重が最も小さい。
- ・溶接部は母材部より降伏点が大きいため、母材一様のケース1に比べると溶接部の物性値を考慮したケース2、6のほうが評価断面1、2では崩壊荷重が大きい。
- ・残留応力がある場合、評価法①では評価断面1、2で崩壊荷重は大きくなる。
- ・評価法②及び③では残留応力による応力やひずみが、外圧による応力やひずみと重ね合わされる箇所と相殺する箇所があるため、崩壊荷重が大きくなる場合と小さくなる場合がある。

残留応力は溶接近傍には影響を与えるものの本オーバーパックの崩壊挙動を支配している胴中央部への影響はほとんどないことが確認された。また、溶接部近傍に与える影響も表面付近などの局所的な評価をした場合に見られるもだけである。

6.1.7 3次元解析モデル

3次元モデルによる解析は、2次元軸対称モデルではモデル化できないオーバーパック形状の形状不整の影響を把握することを目的とし、3次元シェルモデルを用いて行った。解析モデルの形状はJIS B 0405に示される公差等級m（中級）に基づき設定した。

3次元シェルモデルは板厚中心で設定しており、高さは1501.2mm、胴中央部と長軸と短軸方向を入れ替えた長軸590.8mm、短軸589.2mmの楕円とし、板厚は全て149.2mmとした。

材料物性値は全体構造の崩壊は円筒胴部において生じると考えられるため、蓋取り付け部の溶接部強度や形状の影響は3次元解析では考慮しないこととし、試験温度150°Cの引張試験の応力-ひずみ関係から得られた母材の物性値一様とした。

6.1.8 3次元解析結果

(1) 固有値解析結果

3次元シェルによる崩壊解析に先立ち、真円断面モデルと楕円断面モデルによって固有値解析を実施した。その結果、胴全体が内側に変形しながら円形が一方向に（楕円の場合、短軸方向に）つぶれるような形の固有モードで発生すると予想され、解析モデルの形状不整として設定した楕円形が妥当であることを確認した。

(2) 崩壊解析結果

図6.1.8-1に崩壊解析途上の外圧100MPa時点の変形状態を示す。これより、固有値解析で予想した胴全体が内側に変形しながら楕円形が短軸方向につぶれるような形で崩壊に至っていることが分かった。

また、2次元軸対称解析モデルによる崩壊解析と同様に6.1.6項に示す崩壊荷重の評価を行うため、履歴データを習得して崩壊荷重を求めた。その結果を表6.1.8-1に示す。

崩壊荷重を評価した結果、評価法①により胴中央部の履歴から得られた約130MPaが最も小さい値となった。評価法②、③で求めた崩壊荷重は一部を除き、2次元軸対

称モデルによる崩壊解析で求めた崩壊荷重よりも小さい結果となった。

形状不整により崩壊荷重が大幅に低下することも予想されたが、解析の結果、今回考慮した程度の形状不整の場合、崩壊荷重はほとんど低下しないことが分かった。

これは、本オーバーパック構造は非常に厚肉の円筒容器であるため、形状不整の影響を受けやすい弾性座屈ではなく、影響を受けにくい塑性座屈によって崩壊しているためである。

6.1.8 まとめ

本オーバーパック構造に対して、2次元軸対称モデル及び3次元シェルモデルによって、破壊予測解析を実施して得られた結果を以下にまとめる。

- ・オーバーパックの蓋と胴の溶接部の強度は母材部よりも強く、構造全体の崩壊荷重に影響を与えない。
- ・オーバーパックの蓋と胴の溶接部の残留応力を考慮しても構造全体の崩壊荷重に影響を与えない。
- 通常の機械加工での公差の範囲では、形状不整を与えても構造全体の崩壊荷重に影響を与えない。

表 6.1.4-1 2次元解析ケース

ケースNo.	モデル	溶接部物性	残留応力の有無	弾性解析	崩壊解析
1	2次元 軸対称	母材データ	無	○	○
2		母材+E BWデータ	無	○	○
3		母材+MAGデータ	有	-	○
4		母材+TIGデータ	無	○	-
5		母材+TIGデータ	有	-	-
6		母材+TIGデータ	無	○	○
7		母材+TIGデータ	有	-	○

ケース4とケース6の弾性解析の比較の結果、物性値による差異はほとんどないため、崩壊解析についてはTIGデータを用いて解析ケースのみを実施することとした。

表 6.1.6-1 2次元解析崩壊荷重評価結果一覧表

単位: MPa

解析ケース		評価法①	評価法②	評価法③	min 荷重
ケース 1	断面1	210	200	280	130
	断面2	220	300	235	
	断面5	130	160	230	
	断面6	195	355	320	
ケース 2	断面1	220	195	240	130
	断面2	230	305	240	
	断面5	130	160	230	
	断面6	200	355	325	
ケース 3	断面1	185	210	240	130
	断面2	175	300	245	
	断面5	130	160	230	
	断面6	190	355	325	
ケース 6	断面1	220	200	260	130
	断面2	220	310	235	
	断面5	130	160	230	
	断面6	205	360	325	
ケース 7	断面1	180	230	260	130
	断面2	215	290	230	
	断面5	130	160	230	
	断面6	215	360	325	

評価法②では、降伏応力として母材の0.2%耐力を用いて評価した。

表 6.1.8-1 3次元解析崩壊荷重評価結果一覧表

単位: MPa

解析ケース	評価法①	評価法②	評価法③	min 荷重
胴中央部断面 梢円長軸頂点	130	140	245	130
蓋中央部	180	240	190	

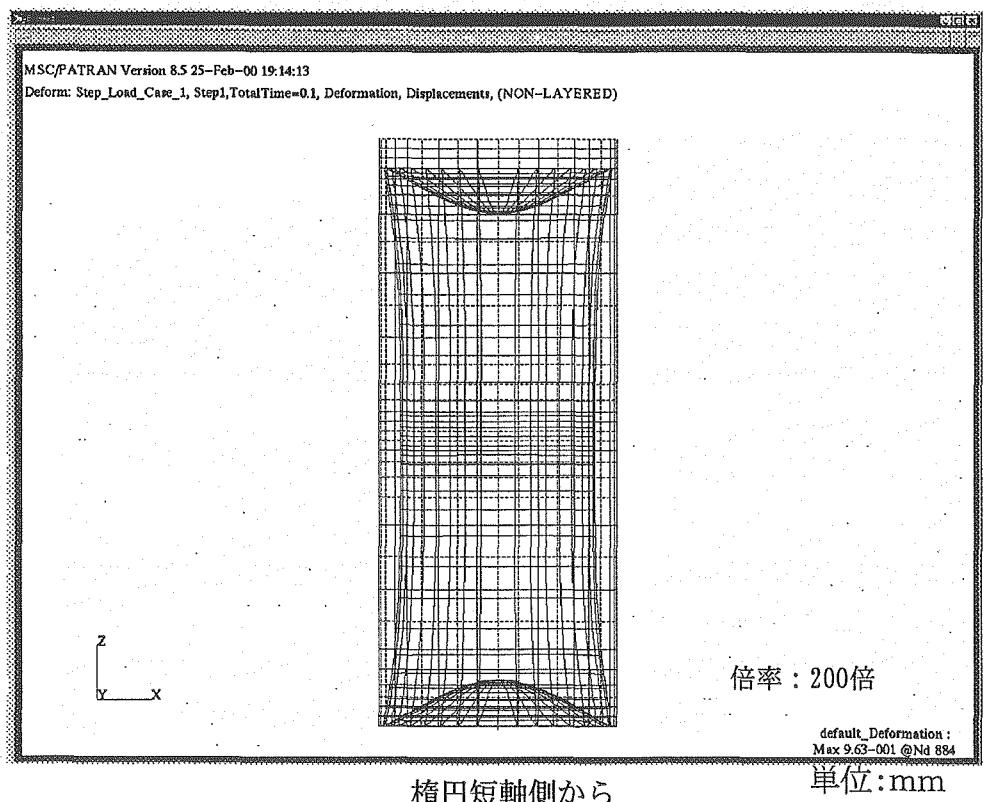
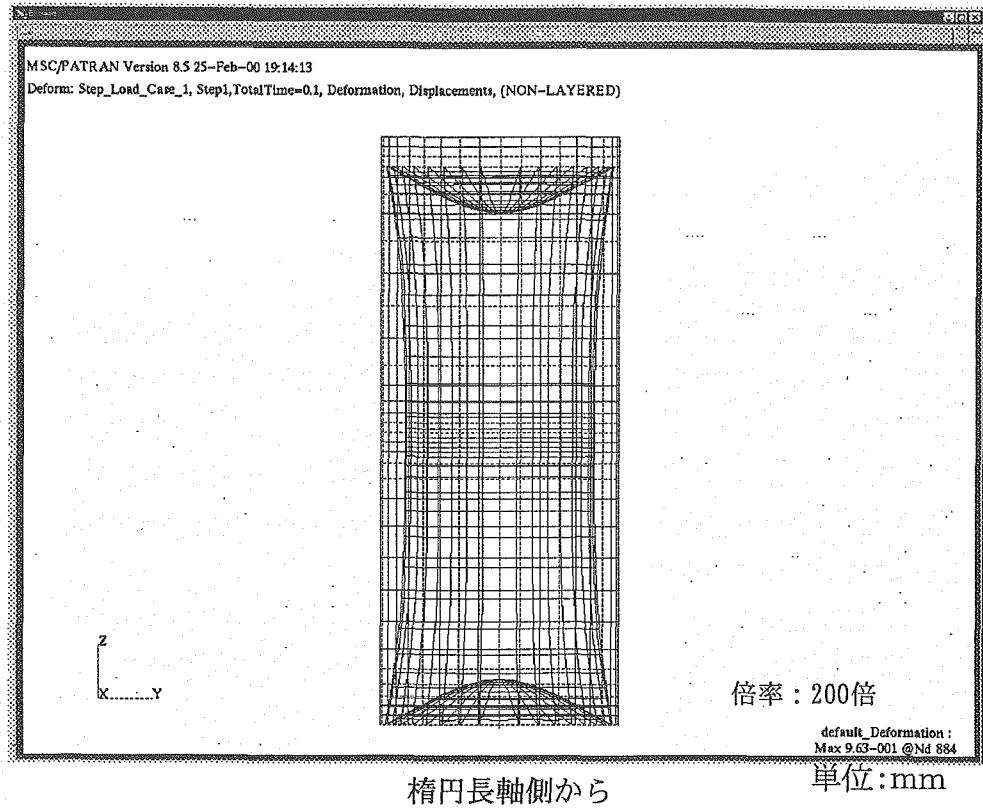


図6.1.8-1 3次元解析変形状態【外圧：100MPa】

6.2 溶接欠陥の影響評価

6.2.1 概要

溶接部にき裂が生成した場合の不安定破壊について検討し、溶接部に許容しうる欠陥サイズについて見通しを検討した。

6.2.2 応力拡大係数の算出と限界き裂寸法の検討

CT試験片を用いた破壊靱性試験により、各溶接継手における各部の破壊靱性値が求められた。この値が実構造物でどの程度の欠陥を許容できるものであるかを検討した。

(1) 計算条件

計算は、付録-6 に示す方法により、表面に溶接線に沿って半楕円のき裂が存在する場合にき裂により生じる応力拡大係数を算出し、それが材料の破壊靱性に相当するためのき裂寸法を限界き裂寸法とした。

計算は欠陥のアスペクト比 ($a/c = \text{き裂深さ} / \text{き裂半長}$) 及びき裂深さをパラメータとして実施した。仮定する平板は本オーバーパックの解析形状より板厚を 150mm とし、板幅は溶接部の周長より 1445mm とした。

欠陥を含む断面の応力は、弾性解析、残留応力解析から推測した。検討に用いた応力を表 6.2.2-1 に示す。

(2) 計算結果

表 6.2.2-1 に示すケース A～D について、き裂の最深部及び表面の応力拡大係数を求めた結果を、5.2 項の破壊靱性試験結果で求めた材料の持つ破壊靱性値と比較して限界き裂寸法を求めた。破壊靱性値についてはもっとも脆い傾向にある EBW 溶接部から $100\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、母材及び熱影響部の最も小さいケースから $160\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、MAG 溶接部及び TIG 溶接部の最も小さいケースから $200\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ を選定し、評価における基準とした。求めた限界き裂寸法を表 6.2.2-2 に示す。

表 6.2.2-2 に示すように、破壊靱性値が低く、応力が大きいケースほど限界き裂深さは小さくなる。許容されるき裂が最も小さくなるケース D における破壊靱性値 $100\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ に対するき裂深さは、アスペクト比 0.1, 0.5, 1.0 に対して、それぞれ 8mm, 12mm, 17mm となる。

6.2.3 まとめ

溶接部にき裂が生成した場合の不安定破壊について検討し、溶接部に許容しうる欠陥サイズについて検討した結果を以下にまとめる。

- ・破壊靱性値は比較的高く、保守的な荷重を想定しても 10mm 程度以下の欠陥が許容される。従って設計評価上は完全溶け込みでない溶接（部分溶け込み溶接）の適用も可能である。
- ・欠陥サイズは、検査精度との関係を調査する必要があるが、検出可能な範囲である

と推定される。

- ・今後の合理化のためには、強度上の必要溶け込み深さは板厚に比べて小さいため、部分溶け込みの採用が考えられる。この場合、破壊強度に与える残留応力の現実的な評価法及び残留応力を除去するための熱処理の要否の検討が必要である。

6.3 評価のまとめ

今回、実施した評価について以下にまとめる。

- (1) 「第2次とりまとめ」に示されたオーバーパック構造を対象に溶接部を考慮した破壊予測解析を実施し、外圧荷重に対しては溶接部の材料特性や残留応力を考慮しても破壊荷重（崩壊荷重）は設計外圧の8倍以上と十分に大きく、問題ないという結果となった。これは、評価に用いたモデルの板厚が耐外圧上の必要板厚より大きな放射線遮へい厚さによって決まっていること及び溶接部が構造の破壊に寄与しない位置にあることによる。
- (2) 製作公差を考慮した形状不整を与えた評価を実施した結果、破壊荷重（崩壊荷重）への影響は小さかった。これは、厚肉構造であるため破壊メカニズムが形状の影響を受けやすい弾性座屈ではなく、構造断面の塑性崩壊によるためである。
- (3) 溶接欠陥による不安定破壊の評価については、保守的な条件で評価した場合でも不安定破壊に至る欠陥サイズは現状の非破壊検査で検出可能なレベルであった。

また、オーバーパック形状を変更した場合の今回の評価結果に関する外挿性を以下に示す。

- (1) 破壊荷重に関しては、形状を変更し、板厚を減じても胴中央部から崩壊は生じるため、蓋と胴の取り付け部の構造不連続や溶接部の材料特性や残留応力の影響は、今回の評価と同様に考慮する必要はないと考えられる。
- (2) 溶接部構造が同じ場合、応力拡大係数は板厚によらず同等であり、許容欠陥サイズも同等となる。これは、応力拡大係数は応力レベルが同等であれば、板厚の影響はほとんど受けないこと、今回評価したように溶接部の残留応力によって材料の降伏点程度の膜応力を想定する場合は、外圧によって生じる応力より十分に大きいため、溶接部断面の応力レベルは板厚によらずほぼ同等となるためである。
- (3) 今回の溶接部欠陥の影響評価は単純な形状での応力拡大係数の算出式を適用したものであり、蓋と胴のはめ合い部の未溶接部の影響などを含め、検討の精度を高めるには詳細な破壊力学評価が必要である。また、溶接部構造が異なる場合についても別途検討が必要である。

表 6.2.2-1 応力拡大係数算出に用いた応力

単位 : MPa

ケース名	膜応力 σ_m	曲げ応力 σ_b	備考
ケースA	24	26	残留応力なしの弾性解析の断面1の値(全ケース共通)
ケースB	224	126	E BW溶接部の残留応力を考慮したときの断面1の値
ケースC	274	26	TIG溶接部の残留応力を考慮したときの断面1の値
ケースD	550	26	溶接部の平均的な降伏応力を膜応力としてケースAに加算した値

表 6.2.2-2 破壊靄性値に対する限界き裂深さ

破壊靄性値	100MPa \sqrt{m}			160MPa \sqrt{m}			200MPa \sqrt{m}		
	アスペクト比 0.1	0.5	1.0	0.1	0.5	1.0	0.1	0.5	1.0
ケースA	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ケースB	22mm	38mm	49mm	43mm	88mm	103mm	56mm	112mm	136mm
ケースC	26mm	42mm	60mm	46mm	86mm	110mm	55mm	115mm	140mm
ケースD	8mm	12mm	17mm	19mm	29mm	42mm	27mm	44mm	62mm

7.おわりに

本研究では、構造不連続部、特に溶接部が構造の健全性に及ぼす影響（局所ひずみや溶接欠陥）の設計的な取り扱いについての見通しを得ることを目的に、溶接部の強度特性等に関する基礎データを取得し、これを用いた破損予測解析等を実施した。

以下に、各項目について研究成果をまとめる。

1) 供試体の設計および溶接施工条件の検討

溶接方法として高品質が期待される電子ビーム溶接、TIG 溶接、MAG 溶接を選定し、試験片の寸法・数量から母材の必要寸法を設定した。さらに、溶接部の品質が実オーバーパックと同等となるよう、冷却速度やピッカース硬さ等から板厚、入熱量などの溶接条件を検討した。

2) 供試体の製作

1) 項の検討結果をもとに、母材である SFVC1 を入手し、電子ビーム溶接と TIG 溶接、MAG 溶接の供試体 3 体を製作した。なお、多層盛り溶接の場合は予熱を行い、化粧盛り溶接など表面加工は施していない。さらに、製作後、放射線透過試験により、JIS Z 3104 1 類以上の高品質の供試体であることを確認した。

3) 強度試験片等の採取・加工

溶接後の各供試体から、引張試験(各 3 個)、破壊靭性試験(各 4 個)、硬さ試験(各 1 個)、組織観察試験用試験片(各 1 個)を採取すると共に、腐食試験用試験片 20cm×40cm ×5cm を切り出しサイクル機構殿へ納入した。

4) 強度試験および組織観察

引張試験(JIS G 0567 に準拠)は室温と 150°C、破壊靭性試験(ASTM E1737-96 に準拠)は溶着金属と熱影響部、各々について 0°C と 150°C で試験を行い、応力ひずみ曲線と J-R 曲線などを取得した。また、母材、溶着金属、熱影響部についてピッカース硬度を取得すると共に、母材、溶接金属、溶接境界部、熱影響部についてミクロ組織(100 倍)、マクロ組織(1 倍)を観察した。

5) 評価

試験結果から得られた溶接部の応力ひずみ曲線、J-R 曲線をもとに構造解析・評価を実施した。解析の結果、溶接部設計手法として次の結論を得た。

- ① 破壊荷重に関しては、形状を変更し、板厚を減じても胴中央部から崩壊は生じるため、蓋と胴の取り付け部の構造不連続や溶接部の材料特性や残留応力の影響は、今回の評価と同様に考慮する必要ないと考えられる。
- ② 溶接部構造が同じ場合、応力拡大係数は板厚によらず同等であり、許容欠陥サイズも同等となる。

ただし、今後、様々な溶接欠陥パターンを模擬した詳細解析や、150mm の厚板での非破壊検査精度の確認を行う必要がある。

8. 謝 辞

本研究を実施にあたり、核燃料サイクル開発機構 東海事業所 環境保全研究・開発センター
処分研究部 処分バリア性能研究グループの関係各位に多大の御指導・御教示を頂きました。こ
こに記して感謝いたします。