

「もんじゅ」第1回取替炉心燃料集合体用
下部端栓溶接及び試験検査報告書
(業務報告)

2000年2月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries 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年

「もんじゅ」第1回取替炉心燃料集合体用
下部端栓溶接及び試験検査報告書
(業務報告)

梶山登司* 沼田和明* 大谷誠二*
小林浩美** 渡辺浩明** 後藤達朗**
高橋秀樹** 永作克彦**

要　旨

高速増殖原型炉「もんじゅ」第1回取替炉心燃料集合体用（80体）として、プルトニウム燃料センター　技術部　品質保証室（旧：プルトニウム燃料工場　検査課）玉造部材検査所において、平成6年6月から平成8年1月にかけて実施した下部端栓溶接工程、試験検査工程及び出荷工程等における作業内容と結果を、とりまとめ報告するものである。

今回、溶接加工及び試験検査を実施した数量は、内側炉心燃料集合体用43体分として7,418本、外側炉心燃料集合体用37体分として6,386本であり、合計で13,804本であった。

このうち、試験検査に合格し、プルトニウム燃料第三開発室へ出荷した下部端栓付被ふく管は、内側炉心燃料集合体用で7,415本、外側炉心燃料集合体用で6,379本となり、合計13,794本であった。

試験検査の不格品は10本発生し、その大部分は溶接部の不格によるものであり、不格率は0.07%であった。

* 東海事業所　プルトニウム燃料センター　技術部　品質保証室

** 検査開発係

February, 2000

Report of Lower Endplug Welding, and Testing and Inspecting
Result for MONJU 1th Reload Core Fuel Assembly

Takasi Kajiyama* Kazuaki Numata* Seiji Ohtani*
Hiromi Kobayashi** Hiroaki Watanabe** Tatsuro Goto**
Hideki Takahashi** Katsuhiko Nagasaku**

Abstract

The procedure and result of lower endplug welding, Test and Inspection and Shipment of the 1th reload core fuel assembly(80 Fuel Assemblies) for the fast breeder reactor MONJU should be report, which had examined and inspected in Tamatsukuri Branch, Material Insurance Office, Quality Assurance Section, Technical Administration Division, Plutonium Fuel Center (before: Inspection Section, Plutonium Fuel Division), from June 1994 to January 1996.

The number of cladding tubes welded to the endplug were total to 13,804, 7,418 for Core - Inside of 43 fuel Assemblies and 6,386 for Core-Outside of 37 fuel Assemblies. 13,794 of them, 7,414 Core-Inside and 6,379 Core-Outside were approved by the test and sent to Plutonium Fuel Center.

10 of them weren't approved mainly because of default welding.

Disapproval rating is 0.07%.

* Quality Assurance Section Technical Administration Division
Plutonium Fuel Center Tokai Works

** Inspection Development Company Ltd

目 次

1. 概要 -----	1
2. 下部端栓溶接施行試験 -----	5
2.1 目的 -----	5
2.2 方法 -----	5
2.3 溶接施行試験結果 -----	7
3. 下部端栓溶接工程 -----	8
3.1 下部端栓番号刻印 -----	8
3.1.1 目的 -----	8
3.1.2 方法 -----	8
3.1.3 作業実績 -----	8
3.2 下部端栓溶接 -----	10
3.2.1 目的 -----	10
3.2.2 方法 -----	10
3.2.3 作業実績 -----	10
4. 試験検査 -----	12
4.1 目的 -----	12
4.2 試験検査結果 -----	12
4.2.1 作業実績 -----	12
4.2.2 不合格発生状況 -----	13
4.3 試験検査の方法及び結果 -----	14
4.3.1 溶接部溶け込み確認 -----	14
(1) 検査方法 -----	14
(2) 検査結果 -----	14
4.3.2 溶接部外観検査 -----	16
(1) 検査方法 -----	16
(2) 検査結果 -----	16
4.3.3 溶接部寸法検査 -----	16

(1) 検査方法	1 6
(2) 検査結果	1 6
4.3.4 X線透過試験検査（フィルムの撮影）	2 2
(1) 検査方法	2 2
(2) 検査結果	2 2
4.3.5 フィルム判定	2 4
(1) フィルム第1判定方法	2 4
(2) フィルム第1判定結果	2 4
(3) フィルム第2判定方法	2 4
(4) フィルム第2判定結果	2 4
4.3.6 最終外観検査	2 5
(1) 検査方法	2 5
(2) 検査結果	2 5
 5. 出荷工程	2 9
5.1 管口マスク取付け	2 9
5.1.1 目的	2 9
5.1.2 方法	2 9
5.1.3 作業実績	2 9
5.2 下部端栓被ふく管等のパレタイズ	3 0
5.2.1 目的	3 0
5.2.2 方法	3 0
5.2.3 作業実績	3 0
5.3 輸送	3 0
5.3.1 目的	3 0
5.3.2 方法	3 0
5.3.3 輸送実績	3 0
 6. 考察	3 2
6.1 溶接溶け込み確認検査	3 2
6.2 溶接部寸法検査	3 2
6.2.1 端栓取付角度検査	3 2

6.2.2 溶接ビード外径検査	32
6.3 工程能力指数による溶接部評価	33

表リスト

表-1 下部端栓溶接工程、試験検査工程及び出荷工程作業実績	3
表-2 下部端栓及び被ふく管の「科技庁」使用前検査受検実績	4
表-3 下部端栓溶接施行試験条件	6
表-4 下部端栓溶接施行試験の試験検査項目及び結果	7
表-5 下部端栓番号刻印作業実績	9
表-6 下部端栓溶接実績	11
表-7 試験検査実績	12
表-8 検査項目及び規格	13
表-9 不合格品発生一覧	13
表-10 下部端栓付被ふく管のX線撮影条件	22
表-11 下部端栓付被ふく管のX線撮影状況	23
表-12 下部端栓付被ふく管輸送実績	31
表-13 工程能力の有無の判断基準	34

図リスト

図-1 下部端栓溶接工程、試験検査工程及び出荷工程フロー	2
図-2 下部端栓溶接施行試験フロー	5
図-3 溶接バッチごとの溶け込み量	15
図-4・1 下部端栓付被ふく管の端栓取付角度及び溶接ビード外径測定位置	17
図-4・2 下部端栓付被ふく管の端栓取付角度及び溶接ビード外径算出フロー	18
図-5 端栓取付角度検査結果〔内側炉心燃料集合体〕	19
図-6 端栓取付角度検査結果〔外側炉心燃料集合体〕	20
図-7 ビード外径検査結果〔内側炉心燃料集合体〕	21
図-8 ビード外径検査結果〔外側炉心燃料集合体〕	21
図-9 管口マスク取付作業 概略	29

写真リスト

・ フィルム写真	26, 27
----------	--------

写真1 インクルージョンのX線撮影例 -----	2 6
写真2 インクルージョンのX線撮影例 -----	2 7
・ 断面金相写真 -----	2 8
写真3 インクルージョンの断面金相写真例 -----	2 8

1. 概要

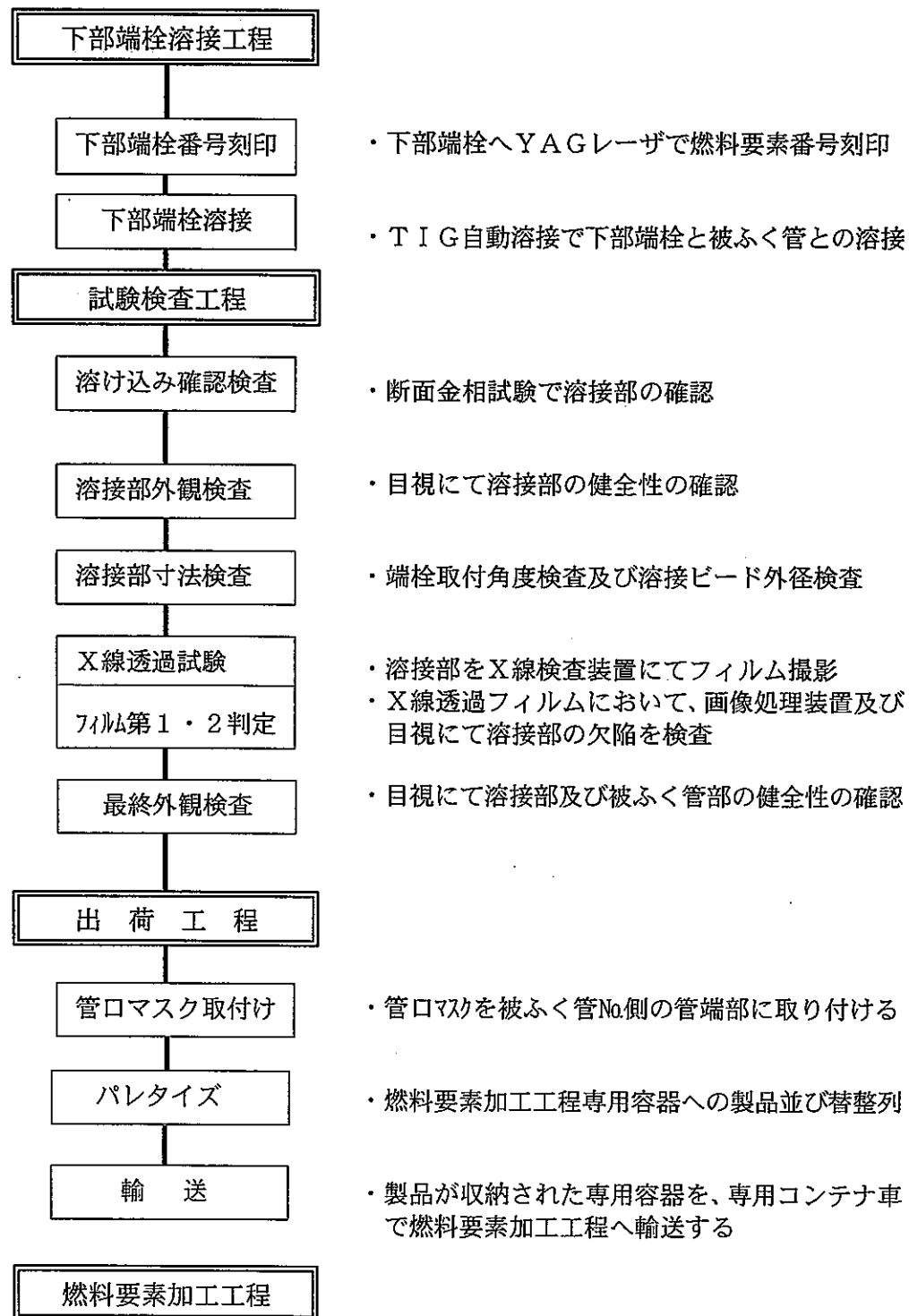
高速増殖原型炉「もんじゅ」炉心燃料集合体の製造における、燃料要素加工工程の一部である下部端栓溶接工程、試験検査工程及び出荷工程は、玉造部材検査所が担当している。これらの工程フローは、図-1に示すとおりである。

今回は、「もんじゅ」炉心燃料集合体の「製造要領書（集合体編）」及び「品質管理要領書（集合体編）」に基づき、第1回取替炉心燃料集合体80体分の下部端栓溶接から出荷までの一連の作業を実施した。

各工程における作業実績を表-1に示す。なお、今回使用した下部端栓及び被ふく管は、3回にわたって実施された「科技庁」による使用前検査に合格したものである。受検実績を表-2に示す。

また、本番溶接に先立ち溶接条件を確認するため、「溶接施行試験要領書」に基づき下部端栓溶接施行試験を実施した。

本報告書は、これらの各工程及び溶接施行試験の結果についてまとめたものである。



□ 内は、各工程で行う作業及び検査項目を示す。

図-1 下部端栓溶接工程、試験検査工程及び出荷工程フロー

表-1 下部端栓溶接工程、試験検査工程及び出荷工程作業実績

工程別処理数量			平成6年度												平成7年度												合計
			4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2		
下部端栓溶接工程	下部端栓番号刻印 [個]	内側炉心燃料集合体用			◇	5000			2415	3(追加分)																	7,418個
		外側炉心燃料集合体用			溶										3704	2677											6,386個
	下部端栓溶接 [本]	内側炉心燃料集合体用			接		2094	1989	1001	2085	246	3(追加分)														7,418本	
		外側炉心燃料集合体用			施										1082	1891	1334	1624	450	5(追加分)						6,386本	
試験検査工程 (全試験検査項目について表示)	内側炉心燃料集合体用				行			2805	1925	2685	3(追加分)															7,418本	
	外側炉心燃料集合体用				試																					6,386本	
出荷工程 (管口マスク取付, パレタイズ) [本]	内側炉心燃料集合体用				驗							▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼							7,415本	
	外側炉心燃料集合体用			◇								720	2160	720	720	2880	215									6,379本	
「科技庁」 使用前検査	下部端栓 [個]		▽	5000			▽	5000		▽	3866															13,866個	
	被ふく管 [本]		▽	5000			▽	5000		▽	3866															13,866本	

表-2 下部端栓及び被ふく管の「科技庁」使用前検査受検実績

受検回数	使用前検査実施日	部材名称	受検数量	対象ロット		燃料集合体の種類	購入区分	
				ロット番号	数量			
1	平成6年 5月27日	下部端栓	5,000 個	70101	4,000 個	内側炉心 燃料集合体	'もんじゅ' 取替燃料用 第1回購入	
				70102	1,000 個			
		被ふく管	5,000 本	20101	322 本			
				20102	534 本			
				20103	312 本			
				20104	313 本			
				20105	613 本			
				20106	461 本			
				20107	733 本			
				20108	663 本			
				20109	32 本			
2	平成6年 9月14日	下部端栓	5,000 個	70102	3,650 個	内側炉心 燃料集合体	'もんじゅ' 取替燃料用 第1回購入	
				70103	1,350 個			
		被ふく管	5,000 本	10101	1,036 本	内側炉心 燃料集合体		
				10102	1,045 本			
				10103	1,405 本			
				10104	333 本			
				10105	142 本	外側炉心 燃料集合体		
				10106	147 本			
				10107	349 本			
				10108	543 本			
3	平成6年 12月2日	下部端栓	3,866 個	70103	3,066 個	外側炉心 燃料集合体	'もんじゅ' 初装荷燃料 用購入	
				60019	800 個			
		被ふく管	3,866 本	10023	120 本			
				10024	612 本			
				10025	434 本			
				10026	152 本			
				10108	322 本			
				10109	1,744 本			
				10110	482 本			

2. 下部端栓溶接施行試験

2.1 目的

実際の溶接条件に基づき、下部端栓と被ふく管との溶接を実施し、それらについて各種の試験検査を行い、溶接条件が適切であることを確認するものである。

2.2 方法

溶接施行試験は、品質保証文書の「溶接施行試験要領書」に基づき、図-2に示すフローに従って実施する。また、溶接は「溶接作業者認定基準」に基づき認定された作業者が行う。

なお、施行試験に使用した被ふく管は、通常（長さ2, 750mm）のものを半分に切断（長さ1, 375mm）したものであり、溶接条件は、溶接先行試験により定めた表-3の下部端栓溶接施行試験条件で実施する。

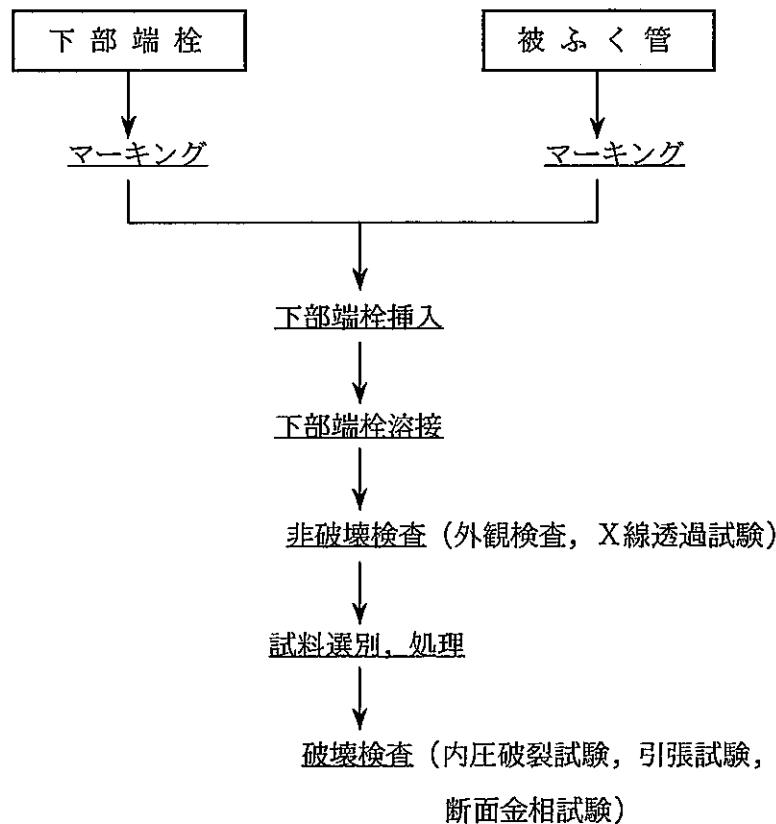


図-2 下部端栓溶接施行試験フロー

表-3 下部端栓溶接施行試験条件

1. 溶接法	TIG自動溶接
2. 溶接設計	
母材の種類	
被ふく管	SUS316相当ステンレス鋼 (PNC316)
下部端栓	ステンレス鋼 (JIS G4303 SUS316相当品)
溶接材	使用しない
溶接雰囲気	アルゴン・ヘリウム混合ガス
溶接層	
層数	1層
溶接部予熱	行わない
溶接部応力除去	行わない
3. 溶接機	TIG自動溶接機
台数	1台
電極材料	イットリウム入りタンクステン電極
電極直径	φ 1.0 mm
4. 溶接条件	
溶接電圧	12 ~ 18 V
溶接電流	(A1) 15.0 A (A2) 13.0 A
溶接速度(回転数)	20 rpm
溶接回転数	3 1/2 回転
溶接時間	(T1) 1.0 sec (T2) 5.0 sec (T3) 3.0 sec (T4) 1.5 sec
トーチガス流量	なし
カバーガス流量	(Ar) 1.0 l/min (He) 9.0 l/min
5. 溶接作業	
溶接姿勢	下向き
溶接条件設定	自動式

(A1) : 一次電流, (A2) : 二次電流

T1 : アップスロープ時間, T2 : 一次電流時間

T3 : 二次電流時間, T4 : ダウンスロープ時間

2.3 溶接施行試験結果

溶接施行試験は、下部端栓溶接開始前の平成6年6月に20試料について実施し、各々について、非破壊検査及び破壊検査を行った。

各試験検査項目及び結果を表-4に示す。すべての試料は、それぞれの判定基準をすべて満足しており、下部端栓の溶接条件として適正であることを確認した。

表-4 下部端栓溶接施行試験の試験検査項目及び結果

試験検査項目		判定基準	試験検査方法	試験本数	試験検査結果	判定
非 破 壊 検 査	1. 溶接部外観	(1)溶接部に汚れがなく清浄であること。 (2)溶接部にアンダーカットのないこと。 (3)溶接部にクラック、ピンホールのないこと。 (4)有害な着色のこと。 (5)肩だれのこと。 (6)ビード巾が著しく不均一のこと。	目視 〃 〃 〃 〃 〃	20本	良好	全数合格
	2. X線透過試験	(1)0.2 mmを超えるプローホール、インクルージョンがないこと。 (2)クラック、空洞のこと。	X線透過法 (直角2方向)	20本	良好	全数合格
破 壊 検 査	3. 内圧破裂試験 破裂圧力 (室温)	破裂圧力が 750kgf/cm ² あること。	内圧加圧法	3本	1,575kgf/cm ² (154.5MPa) 1,555kgf/cm ² (152.5MPa) 1,585kgf/cm ² (155.4MPa)	合格
	4. 引張試験 引張強さ (室温)	破断荷重が 500kgf 以上であること。	引張試験法	3本	663.4kgf (6505.7N) 667.5kgf (6545.9N) 644.6kgf (6321.4N)	合格
	5. 断面金相試験	溶け込みが被ふく管肉厚以上であること。	顕微鏡法	3本	良好	合格

3. 下部端栓溶接工程

3.1 下部端栓番号刻印

3.1.1 目的

下部端栓番号刻印は、各燃料要素の識別管理を行うため、使用前検査に合格した下部端栓に燃料要素番号を刻印する。

3.1.2 方法

刻印作業は、専用の下部端栓番号刻印装置で行う。

本装置は、YAGレーザにQスイッチ（パルス制御）を組み合わせて得られる高速繰り返しパルスレーザ光により、下部端栓の金属面に幅0.1mmの精度で連続彫刻する装置である。連続彫刻ができるため、最大51個の下部端栓が収納できるマガジンを使用している。処理能力は、1日約500個程度であり、これは刻印前のセット及び刻印後の洗浄等の処理状況により若干数量が左右される。

今回の刻印条件を以下に示す。

- ・レーザランプ電流 : 1回目 18A, 2回目 18A
- ・線速度 : 1回目 50mm/s, 2回目 30mm/s
- ・Qスイッチ周波数 : 1回目 3KHz, 2回目 15KHz

なお、第1回取替燃料集合体用燃料要素の下部端栓の刻印番号は、「品質保証記録管理要領書」等に基づき、内側炉心燃料集合体用は「220001～」、外側炉心燃料集合体用は「620001～」とする。

3.1.3 作業実績

下部端栓番号の刻印は、下部端栓の使用前検査進捗状況及び下部端栓溶接進捗状況に対応させ、内側炉心燃料集合体用から開始し、外側炉心燃料集合体用の順に実施した。なお、各月ごとの作業実績を表-5に示す。

内側炉心燃料集合体用の下部端栓番号刻印は、平成6年7月と同年10月で、1日平均464個、延べ16日間で実施した。ここで、8月より2カ月間一時中断しているが、これは平成6年5月に使用前検査を受検した分の下部端栓については、全て刻印を終了したためであり、平成6年9月に使用前検査を受検したのに合わせて10月に再開した。

内側炉心燃料集合体43体分を製造するために燃料要素加工工程で必要な下部端栓付被ふく管は、7,415本であるが、下部端栓溶接における不合格品が発生したため、最終的に3個多い7,418個の刻印を行った。

外側炉心燃料集合体用の下部端栓番号刻印は、平成6年12月から平成7年1月までの間と同年の6月で、1日平均426個、延べ15日間で実施した。

外側炉心燃料集合体37体分を製造するために燃料要素加工工程で必要な下部端栓付被ふく管は6,381本であるが、下部端栓溶接における不合格を考慮し、最終的に5個多い6,386個の刻印を行った。

下部端栓番号刻印は、下部端栓の使用前検査受検数量13,866個（内側及び外側炉心燃料集合体の合計）に対し、13,804個について実施したが1個も不良品は発生しなかった。

なお、下部端栓の使用前検査受検数量と刻印数量の差62個は、下部端栓溶接工程の歩留り分として約0.5%をみていたが、0.07%と不良率が低かったため生じたものである。

表－5 下部端栓番号刻印作業実績

年 度	月	下部端栓 番号刻印 数量	年 度	月	下部端栓 番号刻印 数量
平成6年度	4	6,000 個	平成7年度	4	
	5			5	
	6			6	5個
	7			7	
	8			8	
	9			9	
	10			10	
	11			11	
	12	3,704 個		12	
	1	2,677 個		1	
	2			2	
	3			3	

■ は内側炉心燃料集合体用を、網掛け無しは外側炉心燃料集合体用を示す。

3.2 下部端栓溶接

3.2.1 目的

もんじゅ炉心燃料集合体「製造要領書（集合体編）」に基づき、燃料要素番号を刻印した下部端栓と被ふく管を、あらかじめ溶接施行試験で確認された溶接条件で、TIG溶接するものである。

3.2.2 方法

下部端栓溶接に使用する下部端栓溶接装置は、被ふく管ローディング部、端栓供給部及び溶接機等で構成されている。搬入、搬出台上のパレットに最大30本収納される被ふく管を1本ずつ自動的に取り出し、端栓マガジンに最大30個収納される下部端栓を被ふく管の先端に挿入し、不活性ガスでシールドされたチャンバ内に搬入する。搬入後、下部端栓及び被ふく管を各々コレットチャックにてチャックし、回転させながら溶接位置決めの微調整を行い、TIG自動溶接機により溶接するものである。

3.2.3 作業実績

下部端栓の溶接は、被ふく管及び下部端栓の「科技庁」による使用前検査と下部端栓番号刻印作業及び試験検査工程の進捗状況に合わせ、内側炉心燃料集合体用、外側炉心燃料集合体用の順に実施した。各月ごとの作業実績は表-6に示すとおりであり、表中に示す溶接バッチとは、同一溶接条件で連続して溶接した製品の単位で、原則として1日の溶接作業で加工した製品全てを1溶接バッチとしている。

また、内側、外側炉心燃料集合体用の溶接条件は全て同一であり、1日の溶接数量は、約100本であった。

内側炉心燃料集合体用の溶接は、平成6年8月から同年12月まで実施し、溶接バッチ数は70バッチであった。溶接本数としては、3.1.3項の下部端栓番号刻印の作業実績と同様の理由により、最終的に7,418本の溶接を行った。

外側炉心燃料集合体用の溶接は、平成7年1月から同年6月まで実施し、溶接バッチ数は68バッチであった。溶接本数としては、3.1.3項の下部端栓番号刻印の作業実績と同様の理由により最終的に6,386本であった。

下部端栓溶接は、被ふく管の受検数量13,866本に対し、13,804本について延べ138溶接バッチで実施した結果、10本の不良品が発生し、不良率は約0.07%であった。詳細は、表-9の不合格品発生一覧に示す。

表-6 下部端栓溶接実績

年 度	月	下部端栓溶接		年 度	月	下部端栓溶接	
		溶接 ハーフ数	処理量			溶接 ハーフ数	処理量
平成 6 年度	4			平成 7 年度	4	17	1,624 本
	5				5	5	450 本
	6				6	1	5 本
	7				7		
	8	19	2,094 本		8		
	9	19	1,989 本		9		
	10	10	1,001 本		10		
	11	20	2,035 本		11		
	12	2	249 本		12		
	1	11	1,082 本		1		
	2	19	1,891 本		2		
	3	15	1,334 本		3		

■は内側炉心燃料集合体用を、網掛け無しは外側炉心燃料集合体用を示す。

4. 試験検査

4.1 目的

もんじゅ炉心燃料集合体「品質管理要領書（集合体編）」に基づき、第1回取替炉心燃料集合体用に加工した下部端栓付被ふく管の試験検査を行い、規格を満足していることを確認する。

4.2 試験検査結果

4.2.1 作業実績

試験検査は平成6年8月から平成7年7月にかけて実施した。各月ごとの試験検査実績を表-7に示す。また、各試験検査の規格を表-8に示す。

なお、表-7の試験検査項目のフィルム第1，第2判定については、「検査員認定基準（非破壊編）」に基づき認定された検査員が判定を行った。

表-7 試験検査実績

試験検査項目	平成6年度											平成7年度				
	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月					
溶接部溶け込み確認検査 [パッチ]	4	5	2	4	1	2	4	5	4	1	1					
溶接部外観検査 [本]	1631	2037	1332	1809	609	620	1881	1414	1463	1003			5			
溶接部寸法検査 [本]	1631	2037	1332	1809	609	620	1881	1414	1463	1003			5			
X線透過試験 [本]	1031	2149	1750	1628	860	350	1389	1708	1633	1301			5			
フィルム第1判定 [本]	747	2158	1875	1281	1357	200	1489	1429	1569	1319	375		5			
フィルム第2判定 [本]	1631	2037	1332	1809	609	50	1418	1358	1486	1241	828		5			
最終外観検査 [本]			2805	1925	2688						1539	4392	455			

[] 内側炉心燃料集合体 [] 外側炉心燃料集合体

表-8 検査項目及び規格

検査項目		規格
溶接部検査	ビード部外観	<ul style="list-style-type: none"> ・溶接部にアンダーカットのないこと。 ・溶接部にクラック, ピンホールのないこと。 ・著しい着色のこと。 ・溶接ビード部に汚れがなく清浄であること。 ・著しい肩だれのこと。 ・溶接ビード巾が著しく不均一でないこと。
	X線透過試験	<ul style="list-style-type: none"> ・0.2 mmを超えるブローホールまたはインクルージョンがないこと。 ・溶け込みが被ふく管肉厚以上であること。 ・空洞のないこと。
	断面金相試験	<ul style="list-style-type: none"> ・溶け込みが被ふく管肉厚以上であること。
寸法検査	ビード部外径	<ul style="list-style-type: none"> ・$\phi \leq 6.65 \text{ mm}$
	下部端栓取付角度	<ul style="list-style-type: none"> ・$\leq 15'$

4.2.2 不合格発生状況

試験検査ごとの不合格発生状況を表-9に示す。

内側炉心燃料集合体用で3本、外側炉心燃料集合体用で7本が不合格となり、不合格率はそれぞれ約0.04%及び0.1%であった。

表-9 不合格品発生一覧

燃料集合体区分	発生理由	不合格品本数
内側炉心燃料集合体用	溶接部外観検査不合格（溶接ビード巾不均一）	1本
	溶接部外観検査不合格（溶接ビード着色）	1本
	最終外観検査不合格（被ふく管部の曲がり $\geq 0.25 \text{ mm}$ ）	1本
外側炉心燃料集合体用	最終外観検査不合格（被ふく管部打ち傷）	1本
	溶接部外観検査不合格（下部端栓部スパッタ）	1本
	溶接部外観検査不合格（溶接ビード巾不均一）	1本
	X線透過検査不合格（インクルージョン） 写真1, 2, 3参照	4本

4.3 試験検査の方法及び結果

4.3.1 溶接部溶け込み確認

(1) 検査方法

溶接バッチごとに溶接した試験試料のうち、週の最終溶接バッチの試験試料について断面金相試験を行い、溶接部の溶け込み状態を確認し、当該溶接バッチの溶け込み量の健全性評価を行う。

評価の結果、合格の場合は、その週間に実施した全ての溶接バッチを合格とする。

不合格の場合は、当該バッチの任意の製品を再検査し、この試料についても不合格である場合は、この溶接バッチを全て不合格とした上で、その前の溶接バッチ試料を試験し、それ以前の全バッチの合否を判定する。

(2) 検査結果

断面金相試験を内側炉心燃料集合体用 16 試料、外側炉心燃料集合体用 17 試料について実施した。各溶接バッチの溶け込み量を図-3 に示す。

溶け込み量とは、断面金相写真から下部端栓と被ふく管の嵌合部における溶け込み深さ及び被ふく管肉厚を求め、被ふく管肉厚に対する溶け込み深さを百分率で表したものである。

図-3 より、溶け込み量は全て 100% 以上を示しており、規格である「被ふく管肉厚以上」を満足していた。

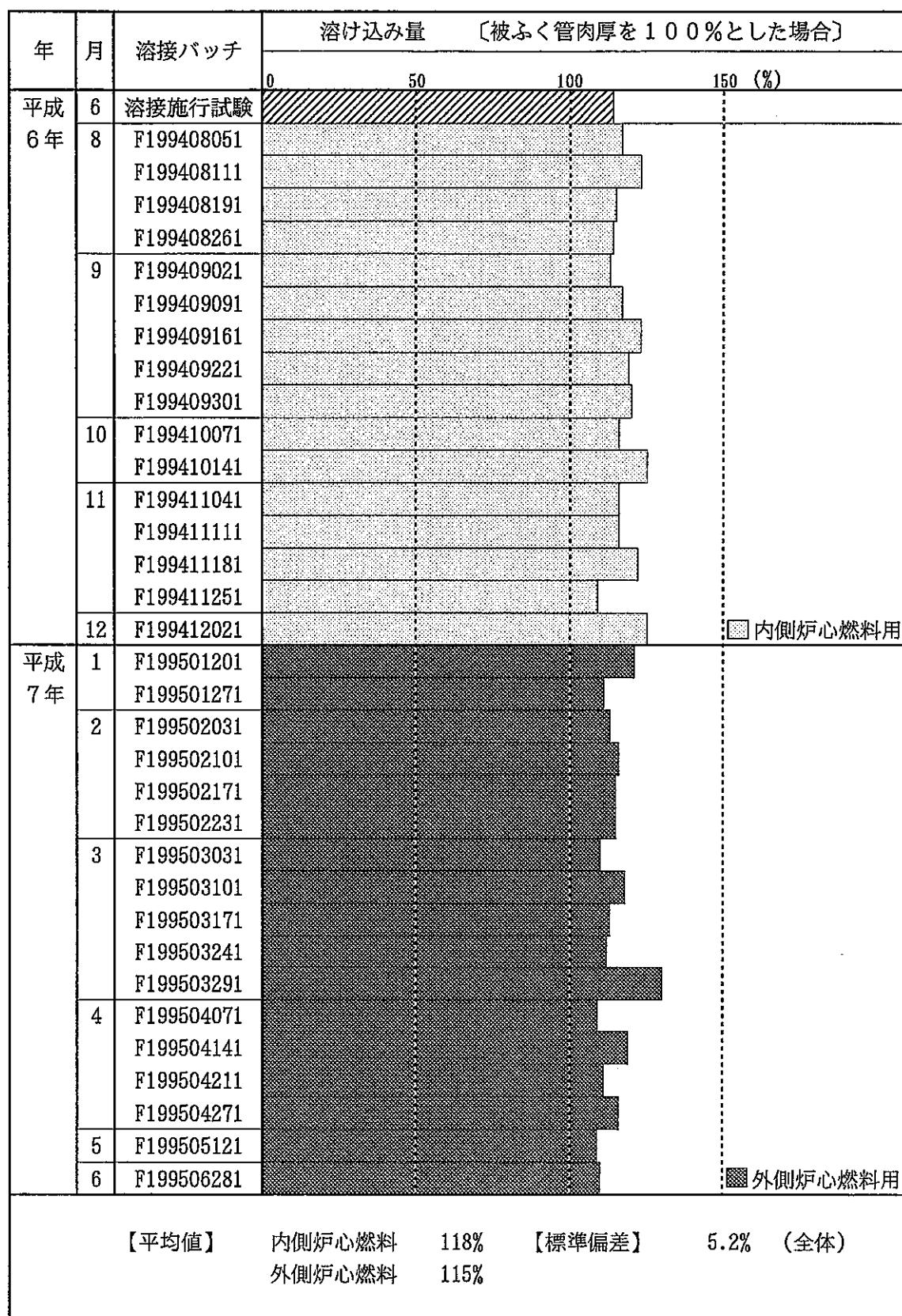


図-3 溶接バッチごとの溶け込み量

4.3.2 溶接部外観検査

(1) 検査方法

T I G 溶接した下部端栓付被ふく管の溶接部を、製品 1 本ごとに全数目視にて健全性の検査を行う。

(2) 検査結果

内側炉心燃料集合体用で、「溶接ビード巾不均一」、「溶接ビード着色」の 2 本、外側炉心燃料集合体用で、「下部端栓部スパッタ」、「溶接ビード巾不均一」の 2 本で合計 4 本の不合格品が確認された。(表-9 参照)

4.3.3 溶接部寸法検査

(1) 検査方法

端栓取付角度検査装置により、下部端栓付被ふく管溶接部の端栓取付角度及び溶接ビード外径を製品 1 本ごとに全数検査を行う。

本装置は、試料供給・収納部、試料回転部、測定部及びデータ処理部等から成る。最大 30 本収納できる試料供給部より搬送された下部端栓付被ふく管を、回転させることにより図-4・1 に示す A, B 点の最大振れ及び C 点の外径を、レーザ測定器で計測し、図-4・2 の算出フローに従って端栓取付角度と溶接ビード外径を検査する自動の検査装置である。なお、溶接ビード外径については、リングゲージ ($\phi 6.65\text{mm}$) でも確認し、ダブルチェックを実施する。

(2) 検査結果

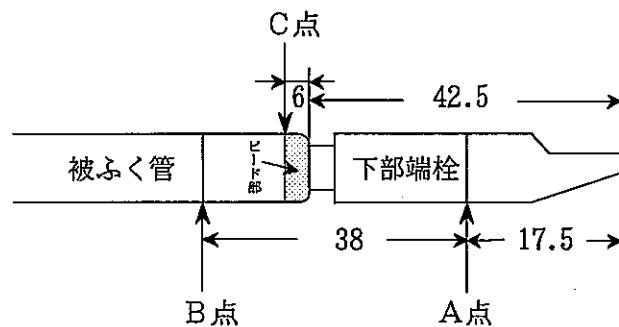
端栓取付角度検査結果を図-5, 6 に、溶接ビード外径検査結果を図-7, 8 に示す。

端栓取付角度は、内側炉心燃料集合体用が平均 $8'4.2''$ 、外側炉心燃料集合体用で平均 $8'2.4''$ であり、標準偏差はそれぞれ $1'1.2''$, $1'2.5''$ であった。

溶接ビード外径の測定値は、内側炉心燃料集合体用が平均 $\phi 6.567\text{mm}$ 、外側炉心燃料集合体用で平均 $\phi 6.565\text{mm}$ であり、標準偏差は、それぞれ 0.009mm , 0.008mm であった。

図-5～8 に示すように、端栓取付角度検査及び溶接ビード外径検査において不合格になるものは認められなかった。

・測定位置 単位 (mm)



・端栓取付角度測定原理

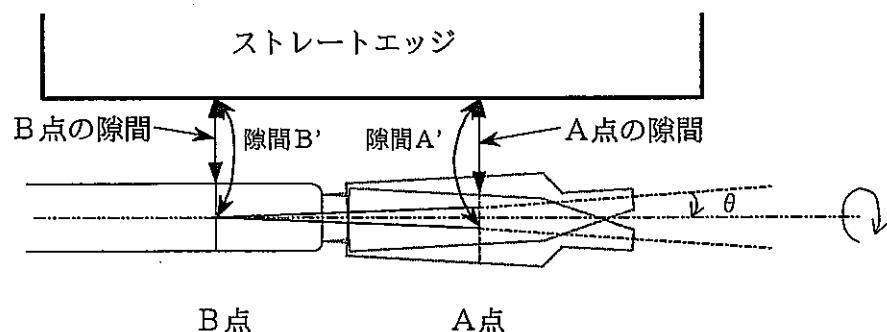


図-4・1 下部端栓付被ふく管の端栓取付角度及び溶接ビード外径測定位置

・算出フロー

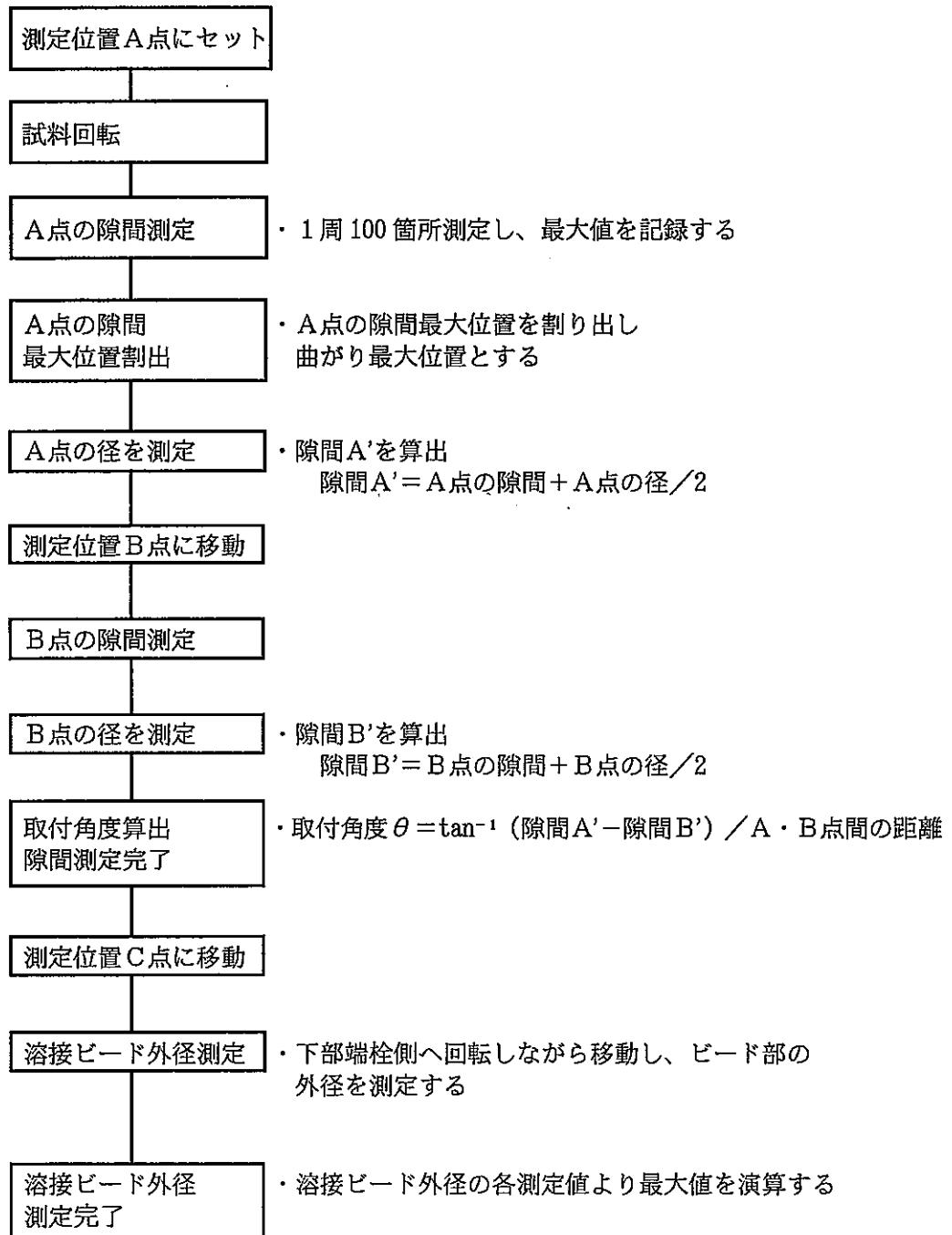


図-4・2 下部端栓付被ふく管の端栓取付角度及び溶接ビード外径算出フロー

		下部端栓付被ふく管数量(本)		
		500	1000	1500
端栓取付角度	150° (2' 30")	1		
	180° (3' 00")	2		
	210° (3' 30")	4		
	240° (4' 00")	2		
	270° (4' 30")	8		
	300° (5' 00")	30		
	330° (5' 30")	61		
	360° (6' 00")	148		
	390° (6' 30")	323		
	420° (7' 00")	575		
	450° (7' 30")	890		
	480° (8' 00")	1129		
	510° (8' 30")	1263		
	540° (9' 00")	1116		
	570° (9' 30")	863		
	600° (10' 00")	524		
【秒】	630° (10' 30")	275		
	660° (11' 00")	128		
	690° (11' 30")	54		
	720° (12' 00")	14		
	750° (12' 30")	5		
	780° (13' 00")	1		
	810° (13' 30")	2		
	840° (14' 00")			
				n=7418
【最小値】		178° (2' 58")		
【最大値】		839° (13' 59")		
【平均値】		522° (8' 42")		
【標準偏差】		72° (1' 12")		
【工程能力指数】		C p = 1.75		
【規 格】		≤ 900° (≤ 15')		

図-5 端栓取付角度検査結果〔内側炉心燃料集合体〕

	下部端栓付被ふく管数量 (本)		
	500	1000	1500
120° (2' 00")	2		
150° (2' 30")	4		
180° (3' 00")	3		
210° (3' 30")	12		
240° (4' 00")	29		
270° (4' 30")	55		
300° (5' 00")	83		
端 330° (5' 30")	100		
栓 360° (6' 00")	175		
取 390° (6' 30")	395		
付 420° (7' 00")	604		
角 450° (7' 30")	881		
度 480° (8' 00")	1058		
【秒】 510° (8' 30")	994		
540° (9' 00")	815		
570° (9' 30")	486		
600° (10' 00")	297		
630° (10' 30")	143		
660° (11' 00")	94		
690° (11' 30")	62		
720° (12' 00")	43		
750° (12' 30")	26		
780° (13' 00")	15		
810° (13' 30")	4		
840° (14' 00")	4		
870° (14' 30")	2		
900° (15' 00")			
			n=6386
【最小値】	135"	(2' 15")	
【最大値】	899"	(14' 59")	
【平均値】	504"	(8' 24")	
【標準偏差】	85"	(1' 25")	
【工程能力指数】	C p = 1.55		
【規 格】	≤ 900"	(≤ 15')	

図-6 端栓取付角度検査結果〔外側炉心燃料集合体〕

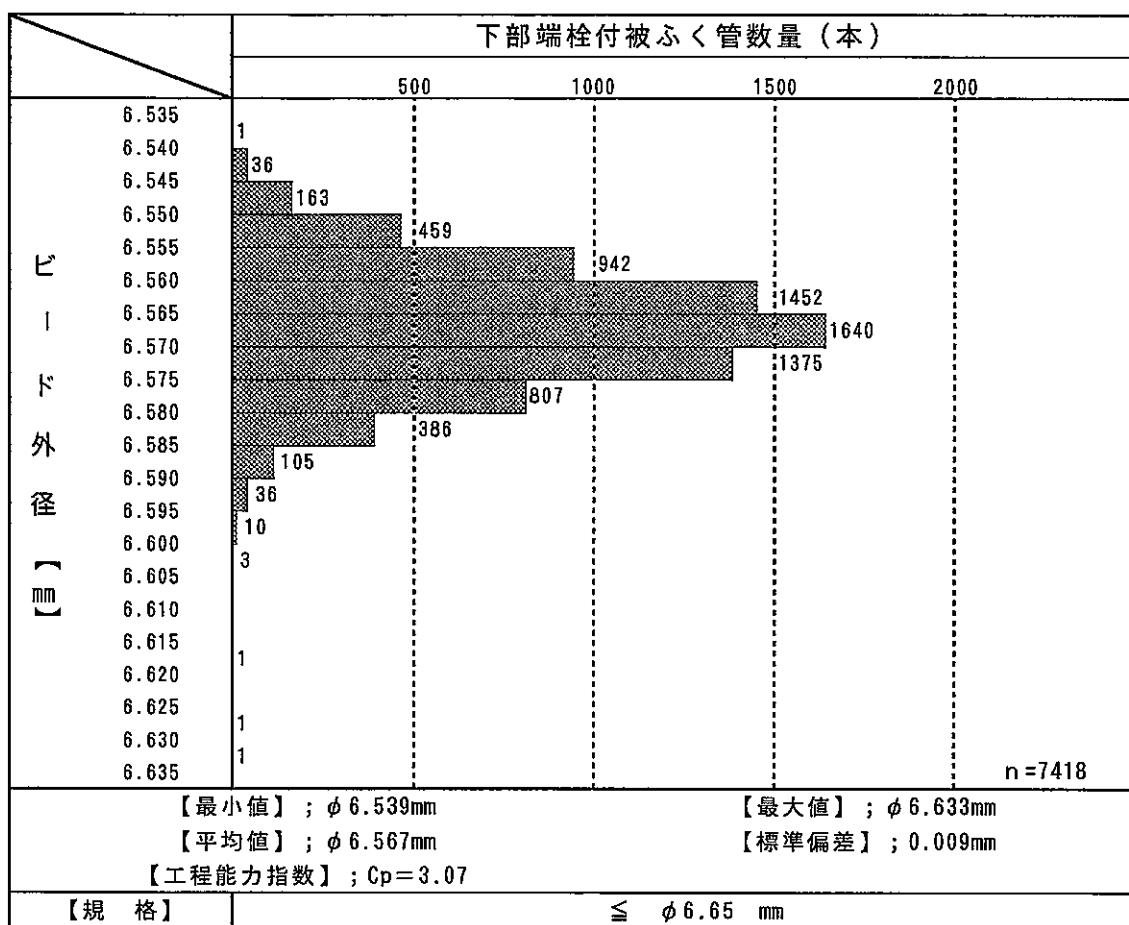


図-7 ビード外径検査結果〔内側炉心燃料集合体〕

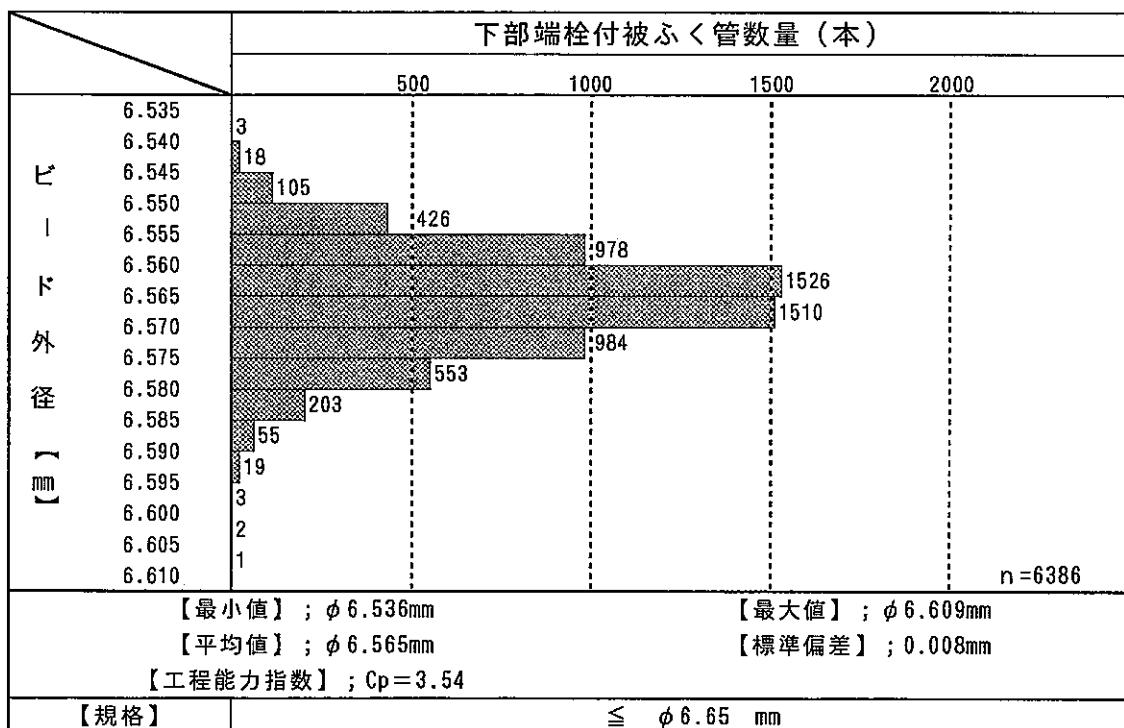


図-8 ビード外径検査結果〔外側炉心燃料集合体〕

4.3.4 X線透過試験検査（フィルムの撮影）

(1) 検査方法

X線透過試験は、X線検査装置を使用して下部端栓付被ふく管溶接部の内部欠陥検査をX線透過法により行うものである。使用した装置は、溶接部の0°・90°の2方向を同一フィルムに撮影でき、フィルムのセット、試料の回転及び撮影（同時撮影最大25本）が自動で行えるものである。撮影に際して、疑似欠陥と欠陥を識別するため、フィルムは二重（正フィルム・副フィルム）とする。

また、フィルムの具備すべき条件は、透過度計識別度がフィルム両端の“ASTM E142 No.7 (S)”ペネトラメータの1T ($\phi 0.2\text{ mm}$) の穴が識別可能であることと、濃度が1.0～3.5の範囲にあることである。

(2) 検査結果

X線透過試験の撮影条件は、表-10に示すとおりである。撮影にあたってはフィルムの濃度変化に伴い適宜露出時間の調整を行い、最適な条件で撮影した。

なお、露出時間に変動があるのは、「もんじゅ初装荷炉心燃料製造報告書 集合体部材試験検査結果 (PNC PN8410 94-234)」の5.4項（問題点とその対策）で述べているように、#25フィルムは、製造後の時間の経過について、感度が高くなる傾向があることと、自動現像機により、フィルムの現像処理を行っていくうちに、フィルムの成分が溶出し、徐々に現像作用が増加することが要因である。

表-10 下部端栓付被ふく管のX線撮影条件

条件No.		1	2	3	4	5
製品番号	内側炉心燃料集合体用	220001～221881 222345～225000	221882～222344 225001～227418			
	外側炉心燃料集合体用		620001～623865	623866～624487	62448～625931	62593～626386
撮影条件	焦点間距離	120 cm	120 cm	120 cm	120 cm	120 cm
	管電圧	145 kV	145 kV	145 kV	145 kV	145 kV
	管電流	10 mA	10 mA	10 mA	10 mA	10 mA
	露出時間	10分30秒	10分00秒	8分30秒	8分10秒	8分40秒
	増感紙種類	(Pb) 0.03 mm 0.05 mm	(Pb) 0.03 mm 0.05 mm	(Pb) 0.03 mm 0.05 mm	(Pb) 0.03 mm 0.05 mm	(Pb) 0.03 mm 0.05 mm
使用フィルム		フジ #25	フジ #25	フジ #25	フジ #25	フジ #25
現像条件	現像温度	23 °C	23 °C	23 °C	23 °C	23 °C
	定着温度	31 °C	31 °C	31 °C	31 °C	31 °C
	処理時間	11分	11分	11分	11分	11分

X線透過試験結果は、表-11に示すとおり、欠陥候補像が内側炉心燃料集合体用で96本分、外側炉心燃料集合体用で102本分に、現れたため再撮影の対象となつた。

再撮影率でみると、内側炉心燃料集合体用が21%、外側炉心燃料集合体用が30%と若干高めであったが、これは、フィルムの0°方向若しくは90°方向いずれかの正、副フィルムの同一位置に、斑点状の陰影が1~3点程度現出したためである。この陰影の現出については、「JIS Z 3106-1971 ステンレス鋼溶接部の透過写真に現れる線状又は斑点状の陰影の原因」によると、現在のところ結晶面によるX線回折であるとの説があるが定説ではなく、今後の研究を待つ必要があると述べられており、原因については未だ特定されていない。

また、これとは別にペネトラメータによる、フィルムの透過度計識別度を確認できないものや、フィルム上の大白点等で判定用フィルムとして使用できないものがあり、これが不良フィルムとなり、内側炉心燃料集合体用で75回、外側炉心燃料集合体用で56回分の再撮影をする結果となつた。

ペネトラメータが確認できない原因については、若干の電源変動等により一定波長のX線が得られなかつたためと思われ、白点等については、社団法人日本非破壊検査協会発行の「放射線透過写真の撮影、透過写真の故障とその対策」によると、増感紙にごみ、その他の異物が付着したまま撮影した場合、濃度の薄い部分が現れことがあると記載されていることから、これらのごみ等が原因であると考えられる。

表-11 下部端栓付被ふく管のX線撮影状況

区分 燃料	全撮影数	陰影による再撮影		フィルム不良による再撮影	
		再撮影数	再撮影率	再撮影数	再撮影率
内側炉心 燃料集合体用	302(回)	63(回) (96本)	21(%)	75(回)	25(%)
外側炉心 燃料集合体用	263(回)	80(回) (102本)	30(%)	56(回)	21(%)

4.3.5 フィルム判定

(1) フィルム第1判定方法

X線透過試験により正フィルムに撮影された下部端栓付被ふく管の溶接部（0°・90°方向）を、画像処理装置に画像として入力して処理を行い、モニターに写し出された溶接部の黒点、白点等の欠陥候補像を、フィルム第1判定員に認定された検査員が判定する。

なお、この画像処理装置は、ワークステーション、ITVカメラ装置及び画像処理装置本体からなり、X線透過法により撮影したフィルムをITVカメラより画像として画像処理装置本体に入力（0°・90°方向，最大25本分）し、解析（積分、強調差分処理）等を施すことにより、欠陥候補像の位置及び大きさ等を抽出、自動計測し、その結果を溶接部の画像と一緒にモニターに写し出すものである。

(2) フィルム第1判定結果

内側炉心燃料集合体用は全て合格であったが、外側炉心燃料集合体用で規格を外れるインクルージョン（タンクステン電極の巻き込みと思われるもの）が、4本確認され不合格と判定した。（表-9参照）

(3) フィルム第2判定方法

フィルム第2判定員に認定された検査員が、第1判定の結果を参考に全ての正・副フィルムをシャウカスデンとアイゲージ（倍率10倍）で拡大して観察し、最終的な合否判定を行う。

(4) フィルム第2判定結果

フィルム第2判定においても、内側炉心燃料集合体用は全て合格であったが、外側炉心燃料集合体用のフィルム第1判定で不合格となった製品4本については、同様（位置及び大きさが同じ）のインクルージョンが確認されたため、不合格と判定した。なお、原因については特定できなかったため、インクルージョン発生の原因を別途究明していくこととした。

今回インクルージョンで不合格となった製品の例として、X線フィルムを直接印画紙に焼き付けた写真を写真1，2に、断面金相写真を写真3に示す。（表-9及びフィルム写真参照）

4.3.6 最終外観検査

(1) 検査方法

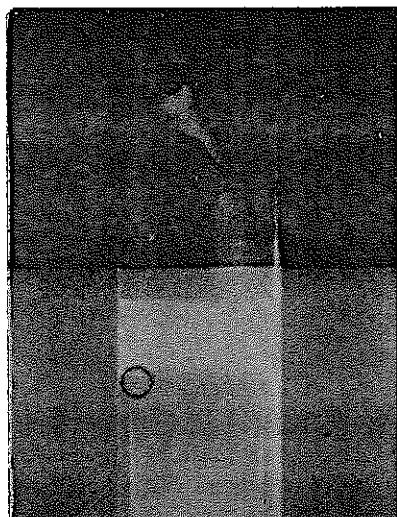
出荷工程前に最終外観検査として、全製品について被ふく管部、端栓部及び溶接部の目視検査を行い、判定基準を超える傷、曲がり等のないことを確認する。

(2) 検査結果

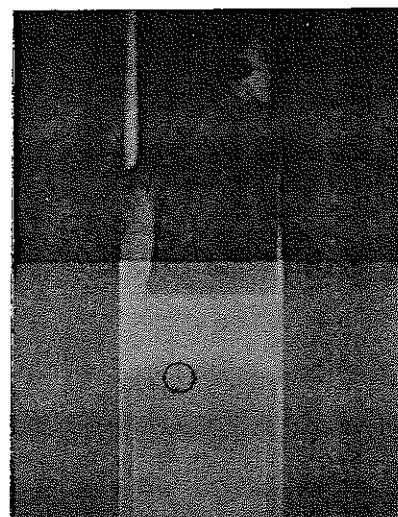
内側炉心燃料集合体用で「被ふく管部の曲がり」が規格値を超えるものが 1 本、外側炉心燃料集合体用で「被ふく管部打ち傷」が 1 本確認され、それぞれ不合格となつた。

このうち、被ふく管部の曲がりは、下部端栓溶接時に被ふく管を移動する際、誤って曲げたものである。(表- 9 参照)

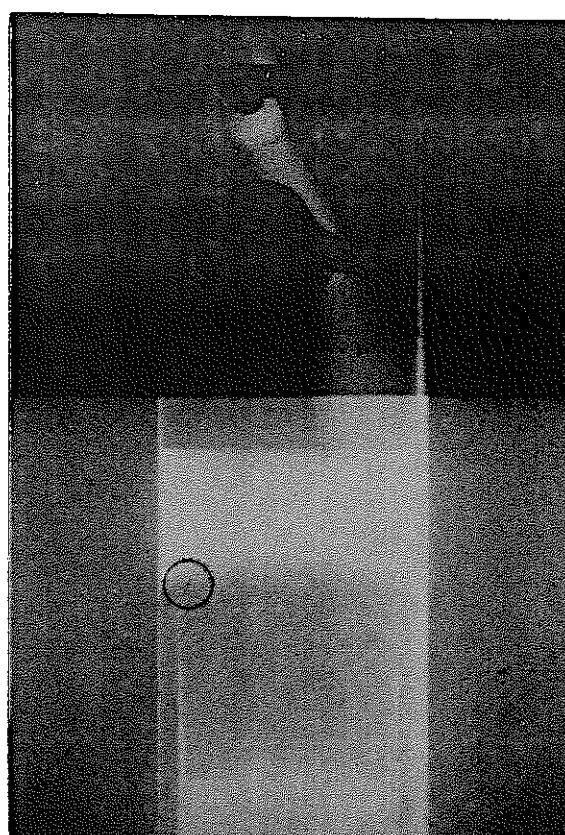
フィルム写真



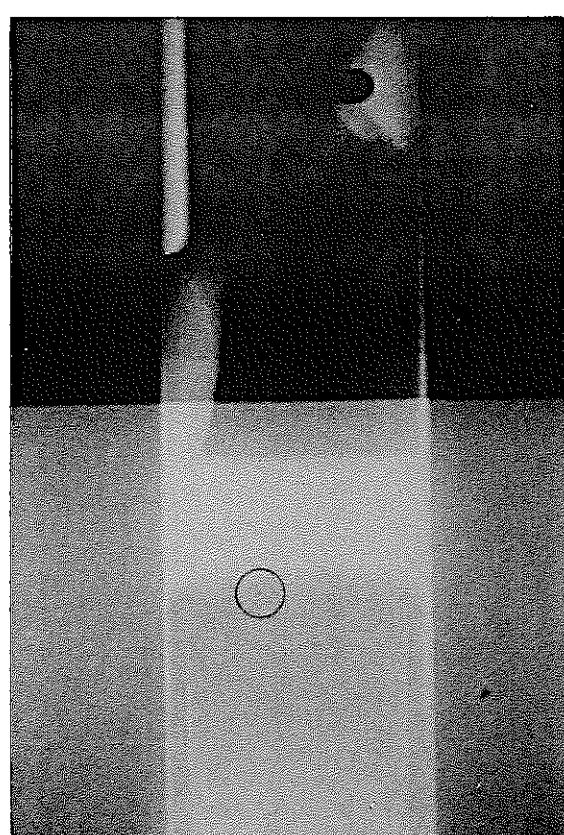
(0° 方向) 3倍



(90° 方向) 3倍



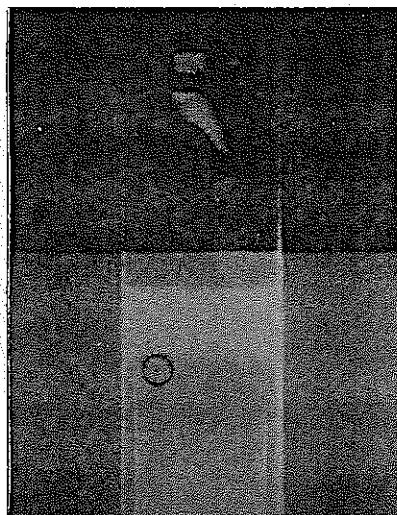
(0° 方向) 5倍



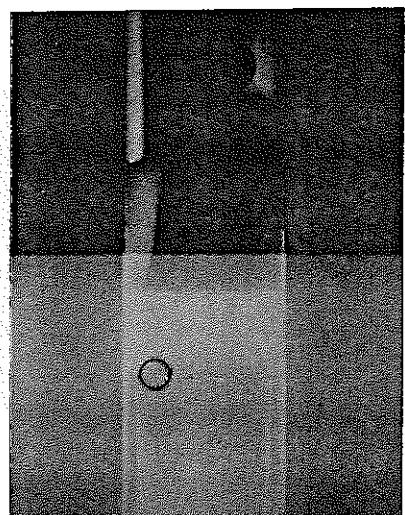
(90° 方向) 5倍

写真1 インクルージョンのX線撮影例

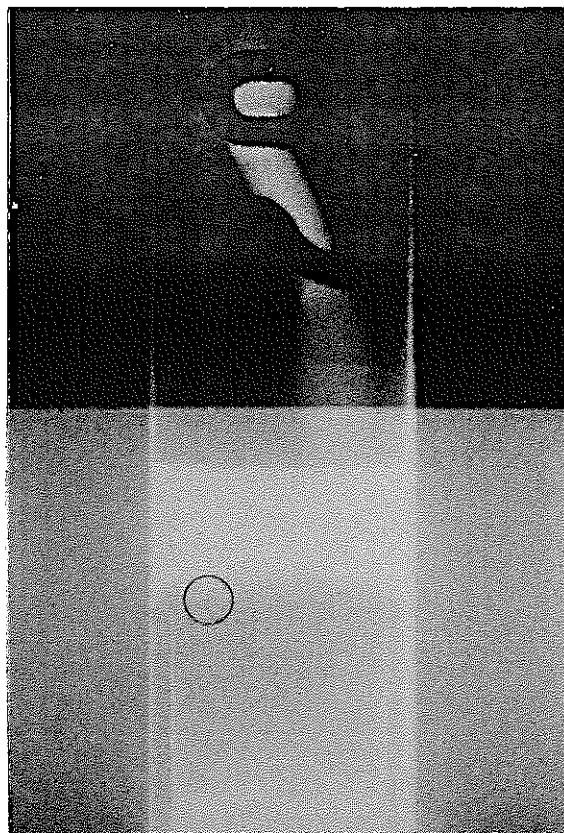
フィルム写真



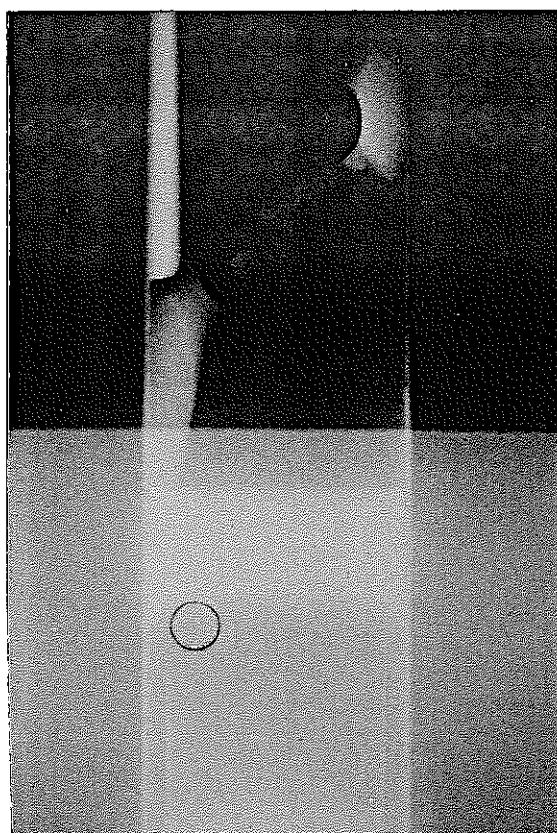
(0° 方向) 3倍



(90° 方向) 3倍



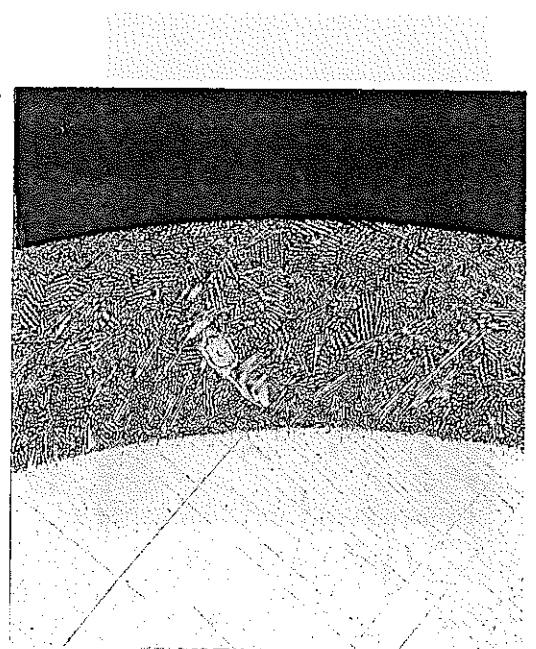
(0° 方向) 5倍



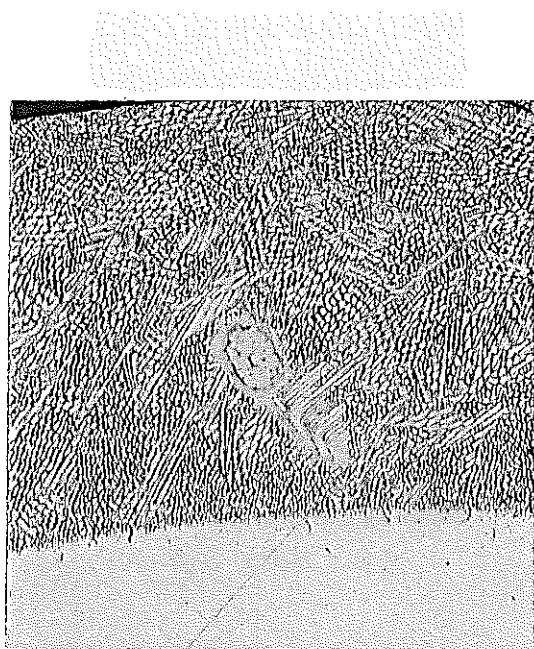
(90° 方向) 5倍

写真2 インクルージョンのX線撮影例

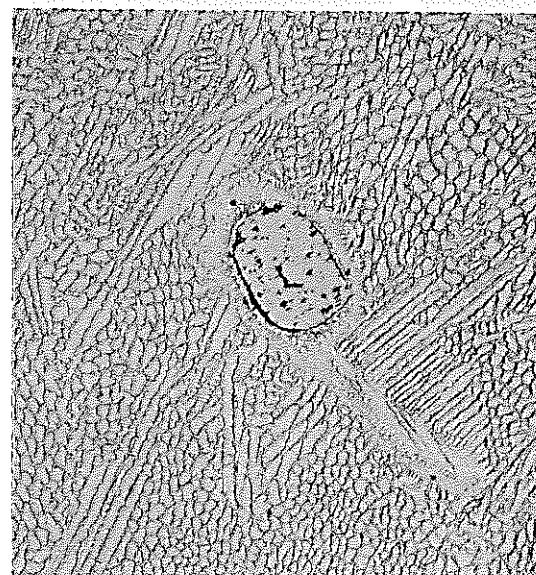
断面金相写真



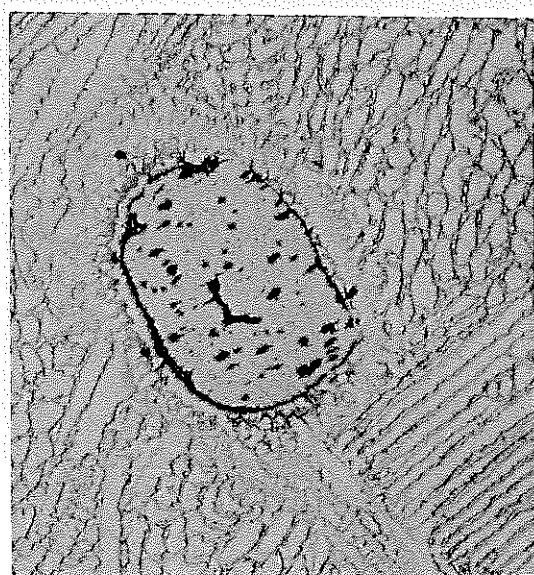
(50倍)



(100倍)



(200倍)



(400倍)

写真3 インクルージョンの断面金相写真例

5. 出荷工程

5.1 管口マスク取付け

5.1.1 目的

燃料要素加工工程での燃料ペレット充填時に発生する管端部の汚染を防止するため、製品の管端部に管口マスクを取り付ける。

5.1.2 方法

管口マスク取り付けは、図-9に示すように作業員が製品に手作業で管口マスクの嵌合部を挿入し、さらにそれらの嵌合部に熱収縮チューブを取り付け、その後、管口マスク取付け装置のヒータにより自動運転で、熱収縮チューブに熱を加えて、製品と管口マスクの接合部を密着、固定させるものである。

なお、本装置は、加熱ヒータ部及び搬送部から構成されており、搬送部パレットの収納本数は最大30本である。また、加熱条件は、ヒータ温度350°C、加熱時間（1本当り）25秒である。

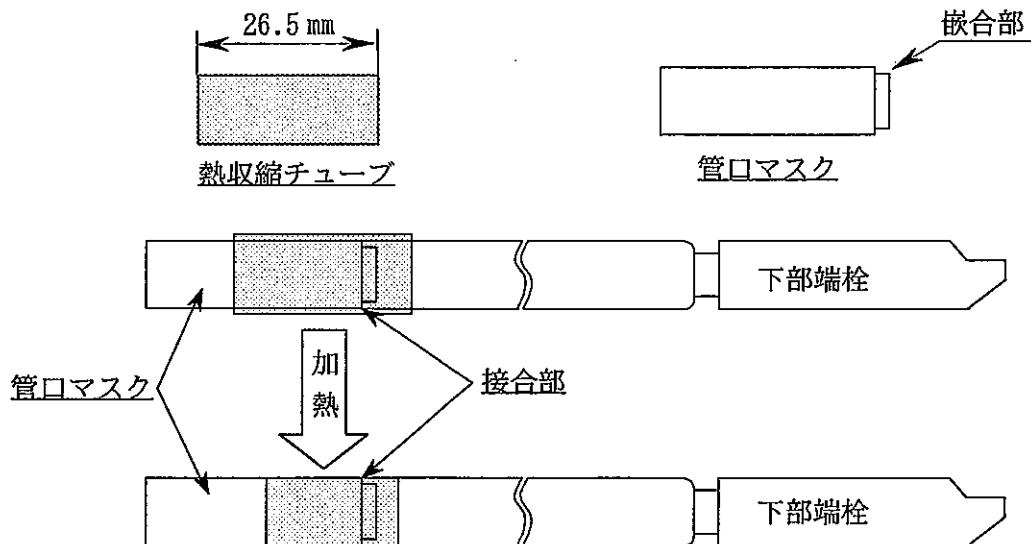


図-9 管口マスク取付作業 概略

5.1.3 作業実績

管口マスク取付けは、燃料要素加工工程への製品出荷（輸送）日に合わせ、出荷日の2週間前以内に、各出荷単位（約720本）ごとに行った。

なお、取り付け作業回数は、内側炉心燃料集合体用で11回、外側炉心燃料集合体用で9回実施した。

5.2 下部端栓付被ふく管等のパレタイズ

5.2.1 目的

管口マスクを取り付けた製品等を、燃料要素加工工程へ輸送（出荷）するために、本検査施設（玉造部材検査所）内で使用している部材収納容器から、燃料要素加工工程で使用する専用容器への積み替え整列を行なう。

5.2.2 方法

燃料要素加工工程出荷情報に対応させ、管口マスクを取り付けた製品を、本検査施設用部材収納容器（収納本数300本、1パレット当たり30本）から燃料要素加工工程専用容器（収納本数240本、1パレット当たり24本収納）へ、出荷単位ごとに作業員が手作業で積み替え整列を行う。

5.2.3 作業実績

パレタイズは、管口マスク取付けの進捗状況に合わせ、燃料要素加工工程への製品輸送日（出荷）の1週間前以内に、各出荷単位（720本）ごとに行った。

なお、パレタイズ数量は、内側炉心燃料集合体用7, 415本、外側炉心燃料集合体用6, 379本であった。

5.3 輸送

5.3.1 目的

燃料要素加工工程から依頼された数量及び時期に合わせ、パレタイズされた下部端栓付被ふく管及び上部端栓、プレナムスリーブ、プレナムスプリング等の燃料要素部材を、専用のコンテナ車にて輸送するものである。

5.3.2 方法

製品等が収納された燃料要素加工工程専用容器を、ホイストクレーンにより専用のコンテナ車に荷積及び固縛し輸送する。

5.3.3 輸送実績

製品等の輸送実績を表-12に示す。

第1回取替燃料集合体用製品等の燃料要素加工工程への輸送は、内側炉心燃料集合体用7, 415本については、第1回目の平成7年1月18日から開始し、同年6月16日の第11回輸送をもって完了した。

また、外側炉心燃料集合体用の6，379本については、平成7年7月7日から平成8年1月19日の間に20回の輸送を行った。なお、輸送1回当たりの本数は720本ほどである。

表-12 下部端栓付被ふく管輸送実績

輸送回数	内側炉心燃料集合体		輸送回数	外側炉心燃料集合体	
	輸送日 (出荷日)	出荷		輸送日 (出荷日)	出荷
		数量			数量
1	平成7.1.18	720本	12	平成7.7.7	720本
2	2. 1	720本	13	7.21	720本
3	2.10	720本	14	8.28	720本
4	2.28	720本	15	10.30	720本
5	3.15	720本	16	11.15	720本
6	4.21	720本	17	11.24	720本
7	5. 8	720本	18	12. 6	720本
8	5.16	720本	19	12.15	720本
9	5.23	720本	20	平成8.1.19	619本
10	5.31	720本			
11	6.16	215本			

6. 考察

本報告書において、各試験検査から得られた結果と、もんじゅ初装荷炉心燃料集合体における検査結果(もんじゅ初装荷炉心燃料製造報告書 集合体部材試験検査結果 PNC PN8410 94-234)とを、簡単に比較してまとめたものを以下に記載する。

6.1 溶接部溶け込み確認検査

内側炉心燃料集合体用 16 試料、外側炉心燃料集合体用 17 試料の断面金相試験結果から、相対的なバラツキを示す変動係数（標準偏差を平均値で割った量）で、内側炉心用及び外側炉心用（33 試料）の溶け込み量のバラツキを見ると、約 4.5 % となる。（図-3 参照）

これは、もんじゅ初装荷時の約 16 % に対し約 1/3 となり、今回の溶接状態が安定していたものと思われる。

一方、溶け込み量は初装荷用に比べ平均で約 11 ~ 13 % 程度少なくなっているが、溶接条件は初装荷用と変わらないことから、「もんじゅ初装荷炉心燃料製造報告書 集合体部材試験検査結果 (PNC PN8410 94-234)」の 5.3 項（下部端栓付被ふく管の試験検査）にも述べているように、直接的な要因としては、未だ特定されていない。

6.2 溶接部寸法検査

6.2.1 端栓取付角度検査

図-5, 6 に示す端栓取付角度検査結果より、内側炉心燃料集合体用と外側炉心燃料集合体用に分けて測定値の分布状態及び変動係数を見ると、測定値の分布状態は、内側炉心用及び外側炉心用とともに正規分布に等しい形を示しており、変動係数によるバラツキの度合いは、内側炉心用で 13.8 %、外側炉心用で 16.9 % であり、初装荷用（内側炉心用：33 %、外側炉心用：29 %）に比べ約 1/2 と非常に小さくなっている。

6.2.2 溶接ビード外径検査

図-7, 8 に示すビード外径検査結果から、内側炉心燃料集合体用と外側炉心燃料集合体用に分けて測定値の分布状態を見ると、内側炉心用及び外側炉心用とともに正規分布に等しい形を示している。

なお、被ふく管ノミナル外径（標準値： $\phi 6.5 \text{ mm}$ ）と溶接ビード外径平均から溶接ビードの盛り上がりを求めるとき、両方とも約 0.03 mm である。

さらに、内側炉心用及び外側炉心用のビード外径と被ふく管ノミナル外径の差（溶

接ビード盛り上り寸法)を用いて変動係数を求めるとき、内側炉心用で13.4%，外側炉心用で12.3%となり、初装荷用(内側炉心用：18.0%，外側炉心用：17.6%)に比べ小さくなっている。

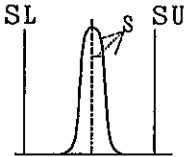
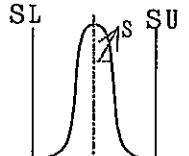
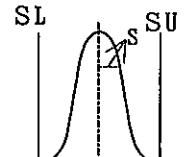
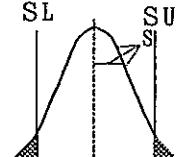
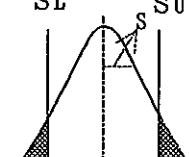
6.3 工程能力指数による溶接部評価

溶接工程における溶接部評価の指標として、端栓取付角度と溶接部ビード外径について、表-13(日本規格協会:QC入門講座より)に示すように、品質のバラツキと規格値との比較を数量的に評価のできる、工程能力指数Cpを用いて評価してみた。

端栓取付角度検査の工程能力指数は、内側炉心用で1.75，外側炉心用で1.55となり、理想的な管理状態の目安である1.33より大きく、工程能力(規格に対する製品の持つ特性値の分布:通常正規分布の場合は平均値±3σ)は十分であることがわかる。

溶接部ビード外径の工程能力指数については、内側炉心用が3.07，外側炉心用が3.54となり、工程能力は十分すぎるくらいであることが分かる。

表-13 工程能力の有無の判断基準

Cp の値	分布と規格の関係	工程能力有無の判断	処置
$C_p \geq 1.67$		工程能力は十分すぎる。	製品のばらつきが若干大きくなても心配ない。管理の簡素化やコスト低減の方法などを考える。
$1.67 > C_p \geq 1.33$		工程能力は十分である。	理想的な状態なので維持する。
$1.33 > C_p \geq 1.00$		工程能力は十分とはいえないが、ますますである。	工程能力をしっかりと行ない管理状態に保つ。Cpが1に近づくと不良品発生のおそれがあるから、必要に応じて処置をする。
$1.00 > C_p \geq 0.67$		工程能力は不足している。	不良品が発生している。全数選別、工程の管理・改善を必要とする。
$0.67 > C_p$		工程能力は非常に不足している。	とても品質を満足する状態ではない。品質の改善、原因の追求を行ない、緊急の対策を必要とする。また、規格を再検討する。

両側規格の場合

$$C_p = \frac{SU - SL}{6\sigma}$$

SU : 上限値

SL : 下限値

 σ : 標準偏差 \bar{x} : 平均値

片側規格の場合

$$C_p = \frac{|SU - \bar{x}|}{3\sigma}$$