

「常陽」照射炉心第6次取替燃料集合体用
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

「常陽」照射炉心第6次取替燃料集合体用下部端栓溶接及び試験検査報告書

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

要 旨

高速実験炉「常陽」照射炉心第6次取替燃料集合体用（46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5年1月から平成8年7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等を、とりまとめ報告するものである。

なお、「常陽」照射炉心第6次取替燃料集合体は、その1燃料集合体用と、その2燃料集合体用に分割されており、その1燃料集合体用に使用する下部端栓及び被覆管の材質は、従来の SUS316 相当ステンレス鋼（以下、SUS316 相当材と略称する）と、新しい材質の高 Ni オーステナイト系ステンレス鋼（以下、PNC1520 材と略称する）の2種類である。

その2燃料集合体用については、従来の SUS316 相当材の1種類である。

今回、溶接加工及び試験検査を実施した数量は、その1燃料集合体用（8体分）が PNC1520 材（5体）696本と SUS316 材（3体）399本の計1,095本、その2燃料集合体用（38体分）が SUS316 材の4,952本であり、第6次取替燃料集合体用合計では6,047本であった。しかし、最終的に燃料要素加工工程へ出荷した下部端栓付被覆管は、その1燃料集合体用の PNC1520 材で694本、SUS316 相当材で397本の計1,091本、その2燃料集合体用の SUS316 相当材が4,938本であり、合計6,029本であった。

試験検査の不合格品は18本発生し、その大部分は溶接部の不合格によるものであり、不合格率は、0.3%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(株)

Report of Lower End plug Welding, and Test and Inspection
for the JOYO 6th Refueling Core Fuel Assembly

Takashi Kajiyama* kazuaki Numata* Seiji Ohtani*
Hiromi Kobayashi** Hiroaki Watanabe** Taturō Goto**
Hideki Takahashi** Katsuhiko Nagasaku**

Abstract

This report describes about procedure and consequence of the welding process of the cladding tube and the lower end plug, the process of the test and inspection and the process of shipment for the 6th refueling core fuel assembly (46 fuel assemblies) of the experimental fast reactor JOYO. These works were carried out on July, 1996 from January, 1993 in Tamatukuri inspection branch of quality assurance section, technical administration division, plutonium fuel center.

The 6th refueling core fuel assemblies are two kinds of the fuel assembly (1) and (2). The material of the lower end plug and the cladding tube used for the fuel assembly(1) is the type 316 stainless steel grade (here in after referred to as SUS316 grade) and austenitic stainless steel of high nickel content (here in after referred to as PNC1520). That material used for the fuel assembly (2) is all SUS316 grade.

The result of welding and the inspection is shown in the following table.

Assembly type	Material	Number of welding and inspection	Number of acceptance	Rejection rate (%)
Assembly(1)	SUS316	399	397	0.50
	PNC1520	696	694	0.29
Assembly(2)	SUS316	4,952	4,938	0.28
Total		6,047	6,029	0.3

Total 6,029 cladding tubes with the lower end plug that accepted by the inspection were transported to the fuel element fabrication process of the plutonium fuel center in tokai works. On the other hand, the cladding tubes with the lower end plug that became rejected by the inspection were 18 in total, and it was 0.3% of all the number.

-
- * 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	11
4.1 目的	11
4.2 試験検査結果	11
4.2.1 作業実績	11
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	14
(1) 検査方法	14
(2) 検査結果	14
4.3.3 溶接部寸法検査	16
(1) 検査方法	16

(2) 検査結果	1 8
4.3.4 X線透過試験検査(フィルムの撮影)	2 7
(1) 検査方法	2 7
(2) 検査結果	2 7
4.3.5 フィルム判定	2 9
(1) フィルム第1判定方法	2 9
(2) フィルム第1判定結果	2 9
(3) フィルム第2判定方法	2 9
(4) フィルム第2判定結果	2 9
4.3.6 最終外観検査	2 9
(1) 検査方法	2 9
(2) 検査結果	3 0
5. 出荷工程	3 0
5.1 管口マスク取付け	3 0
5.1.1 目的	3 0
5.1.2 方法	3 0
5.1.3 作業実績	3 1
5.2 下部端栓付被覆管のパレタイズ	3 1
5.2.1 目的	3 1
5.2.2 方法	3 1
5.2.3 作業実績	3 1
5.3 輸送	3 1
5.3.1 目的	3 1
5.3.2 方法	3 1
5.3.3 輸送実績	3 2
6. 考察	3 3
6.1 溶け込み確認	3 3
6.2 溶接部寸法検査	3 3
6.2.1 端栓取付角度検査	3 3
6.2.2 溶接ビード外径検査	3 3
6.2.3 工程能力指数による溶接部の評価	3 4

7. 本キャンペーン中における問題点とその対策	3 6
7.1 下部端栓部スパッタについて	3 6
7.2 原因	3 6
7.3 対策	3 6
7.4 対策後の結果	3 7

表リスト

表-1 下部端栓溶接工程及び出荷工程作業実績	3
表-2 下部端栓及び被覆管の「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 下部端栓溶接作業実績	1 1
表-7 試験検査作業実績	1 2
表-8 検査項目及び規格	1 3
表-9 不合格品発生状況一覧	1 3
表-10 下部端栓付被覆管のX線撮影条件	2 8
表-11 下部端栓付被覆管のX線撮影状況	2 8
表-12 下部端栓付被覆管輸送実績	3 2
表-13 工程能力の有無の判断基準	3 5

図リスト

図-1 下部端栓溶接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	1 5
図-4 下部端栓付被覆管端栓取付角度及び溶接ビード外径測定位置	1 6
図-5 下部端栓付被覆管の端栓取付角度及び溶接ビード外径算出フロー	1 7
図-6 端栓取付角度検査結果結果【その1 燃料集合体用(PNC1520材)】	1 9
図-7 端栓取付角度検査結果【その1 燃料集合体用(SUS316相当材)】	1 9
図-8 端栓取付角度検査結果【その1 燃料集合体用(PNC1520材, SUS316相当材)】	2 0
図-9 端栓取付角度検査結果【その2 燃料集合体用(SUS316相当材)】	2 1
図-10 端栓取付角度検査結果【その1, 2 燃料集合体用(SUS316相当材)】	2 2

図-11	ビード外径検査結果【その1燃料集合体用(PNC1520材)】	23
図-12	ビード外径検査結果【その2燃料集合体用(SUS316相当材)】	23
図-13	ビード外径検査結果【その1燃料集合体用(PNC1520材,SUS316相当材)】	24
図-14	ビード外径検査結果【その2燃料集合体用(SUS316相当材)】	25
図-15	ビード外径検査結果【その1,2燃料集合体用(SUS316相当材)】	26
図-16	管口マスク取付け方法の概略	30
図-17	対策前	36
図-18	対策後	36

1. 概要

高速実験炉「常陽」照射炉心燃料集合体の製造における、下部端栓溶接工程、試験検査工程及び出荷工程は、燃料要素加工工程の一部であり、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、「常陽」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6次取替燃料集合体46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。

今回使用した下部端栓及び被覆管は、3回にわたって実施された科技庁の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。

ここで、平成6年6月から平成7年12月まで下部端栓溶接工程を中断しているのは、この間に「もんじゅ」第1回取替炉心燃料集合体用の溶接加工を優先したためである。

なお、本番溶接に先立ち「溶接施行試験要領書」に基づき溶接条件を確認するため、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並びに問題点を、まとめたものである。

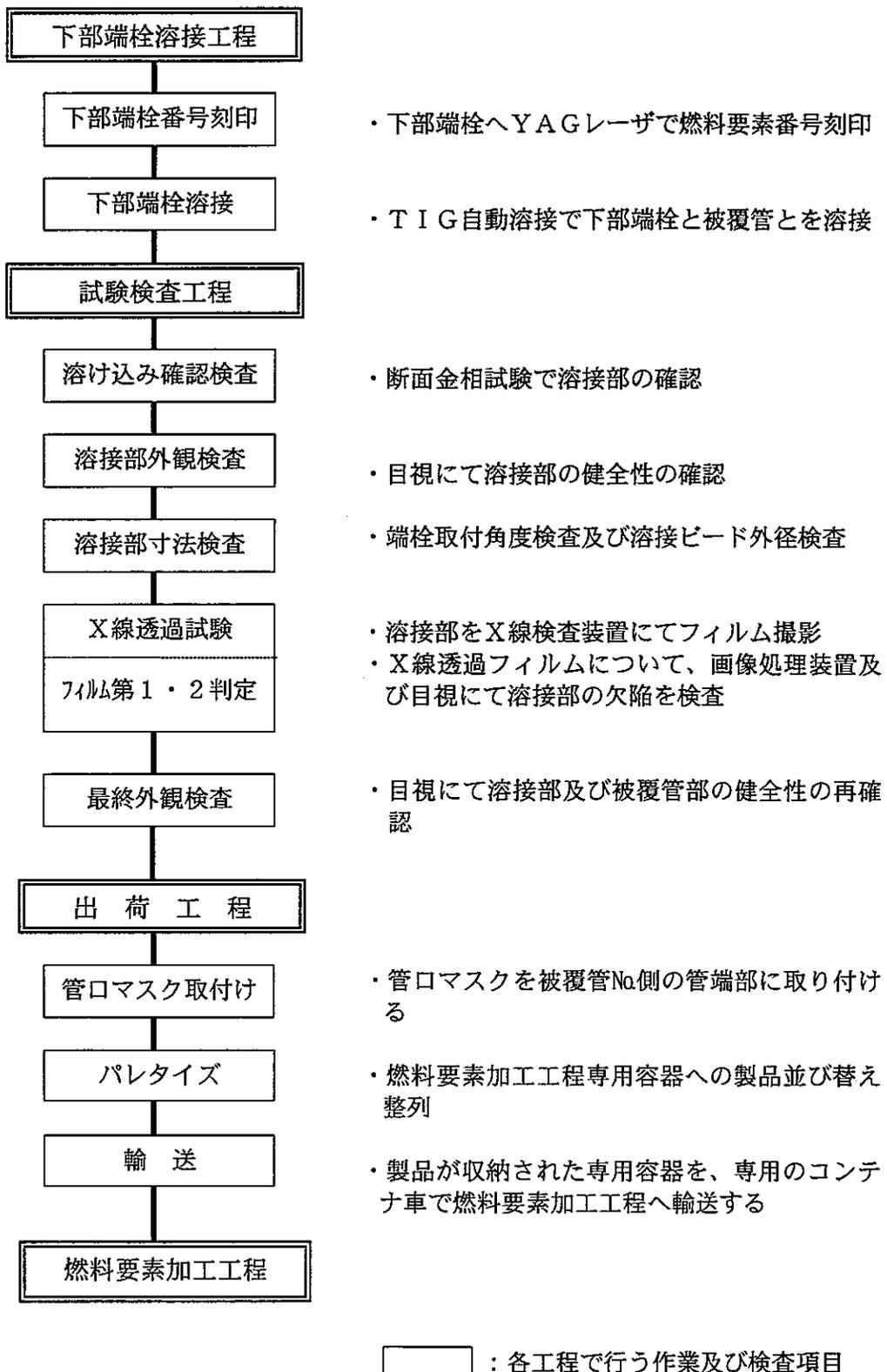


図-1 下部端栓溶接工程及び出荷工程フロー

表-1 下部端栓溶接工程及び出荷工程作業実績

工程別処理数量			年度		平成5年度												平成6年度				平成7年度				平成8年度				合計							
			5	6	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7												
下部端栓溶接工程	下部端栓 番号刻印 [個]	その1 燃料 集合体用	PNC1520 材				694																												696 個	
			SUS316 相当 材					397																											399 個	
		その2 燃料 集合体用	SUS316 相当 材					3773	258	11*																										4952 個
	下部端栓 溶接 [本]	その1 燃料 集合体用	PNC1520 材				489																													696 本
			SUS316 相当 材					397																												399 本
		その2 燃料 集合体用	SUS316 相当 材					513	2932	586	11*																									4952 本
試験検査工程 [本] (各試験検査 項目について 表示)	その1 燃料 集合体用	PNC1520 材					694																												696 本	
		SUS316 相当 材						397																												399 本
	その2 燃料 集合体用	SUS316 相当 材						1251	2039	741	11*																									4952 本
出荷工程 [本]	その1 燃料 集合体用	PNC1520 材																																		694 本
		SUS316 相当 材																																		397 本
	その2 燃料 集合体用	SUS316 相当 材																																		4938 本
「科技厅」 使用前検査	下部端栓	[個]	▽ 702				▽ 4521																												6136 個	
	被ふく管	[本]	▽ 702				▽ 4521																												6136 本	

「もんじゅ」第1回取替炉心燃料集合体の
溶接加工実施のため、一時中断

* ; 下部端栓溶接の不合格品による追加分

表-2 下部端栓及び被覆管の「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No.	数量		
1	平成5年 5月27日	下部端栓	702個	E5601	702個	その1燃料 集合体	第6次取替 炉心燃料集 合体
		被覆管	702本	15601 25601	350本 352本		
2	平成6年 1月20日	下部端栓	4,521個	Y004	399個	その1燃料 集合体	第3次取替 炉心燃料集 合体
					2,241個	その2燃料 集合体	
		被覆管	4,521本	F502	1,881個	その1燃料 集合体	第5次取替 炉心燃料集 合体
				K036 K037 " K038 K039 K040 S597 S598 S599 S600 S601 S602	289本 110本 215本 798本 553本 476本 302本 528本 516本 377本 240本 117本		
3	平成8年 1月25日	下部端栓	913個	70606	773個	その2燃料 集合体	第6次取替 炉心燃料集 合体
				75701	140個		第7次取替 炉心燃料集 合体
		被覆管	913本	10601	913本		第6次取替 炉心燃料集 合体

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、下部端栓と被覆管の溶接を実施し、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か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。表-3に溶接条件を示す。なお、溶接条件については、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。

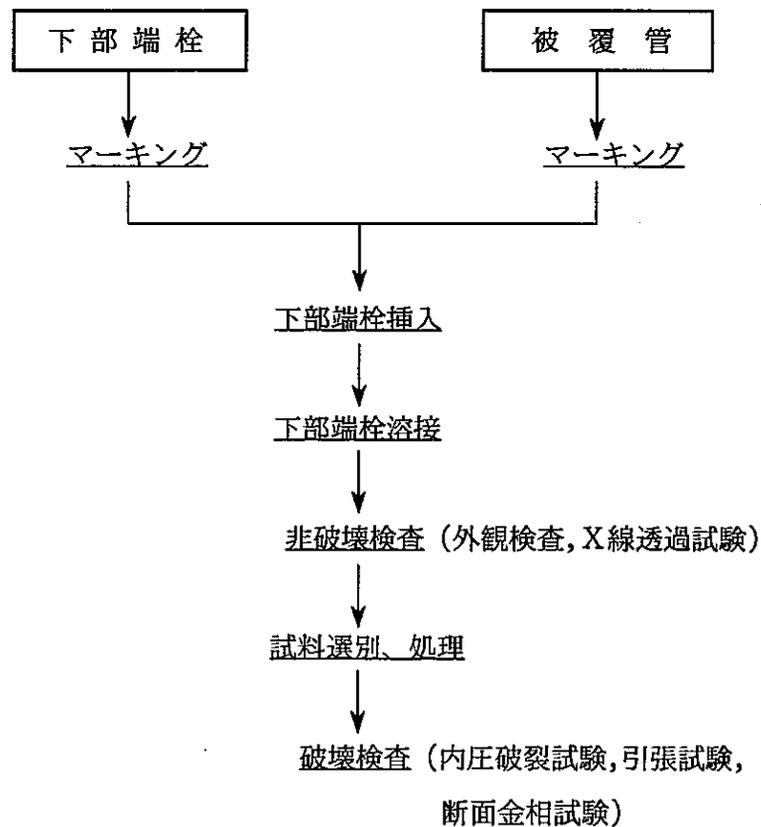


図-2 下部端栓溶接施行試験フロー

表-3 下部端栓溶接施行試験条件

1. 溶接法	T I G 自動溶接
2. 溶接設計	
母材の種類	高Ni オーステナイト系ステンレス鋼
被覆管	SUS 316 相当ステンレス鋼
下部端栓	高Ni オーステナイト系ステンレス鋼
	SUS 316 相当ステンレス鋼
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	T I G 自動溶接機
台数	1台
電極材料	イットリウム入りタングステン電極
電極直径	φ 1.0 mm
4. 溶接条件	
溶接電圧	14 ~ 20 V
溶接電流	(A 1) 9.5 A (A 2) 8.0 A
溶接速度 (回転数)	20 rpm
溶接回転数	3 ¹ / ₂ 回転
溶接時間	(T 1) 1.0 sec (T 2) 4.0 sec (T 3) 3.0 sec (T 4) 2.5 sec
トーチガス流量	8.0 l/min
カバーガス流量	(Ar) 2.0 l/min (He) 8.0 l/min
5. 溶接作業	
溶接姿勢	下向き
溶接条件設定	自動式

高Ni オーステナイト系ステンレス鋼：その1(PNC1520材)

SUS 316 相当ステンレス鋼：その1, その2

A 1:1次電流, A 2:2次電流, T 1:アッスロープの時間

T 2:1次電流時間, T 3:2次電流時間, T 4:ダウンスロープの時間

2.3 溶接施行試験結果

溶接施行試験は、その1燃料集合体用及びその2燃料集合体用として、平成6年1月に実施した。しかし、中断期間により溶接施行試験の有効期限（1年間）をこえたため、その2燃料集合体用として平成8年1月にも実施した。

なお、その1燃料集合体用は、材質がPNC1520材及びSUS316相当材の2種類のため、各々の材質について20本実施した。

これらの非破壊検査及び破壊検査結果については、表-4に示すとおり、各試験検査とも全数合格であり、下部端栓の溶接条件としては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	試験検査結果及び判定					
				H6・1月実施分			H8・1月実施分		
				検査結果		判定	検査結果	判定	
				PNC 1520 材	SUS316 相当材		SUS316 相当材		
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)有害な着色のないこと。 (5)肩だれのないこと。 (6)ビード幅が著しく不均一でないこと。	目視 " " " " "	各20本	良好	良好	全数合格	良好	全数合格
	2. X線透過試験	(1)0.2mmを超えるブローホール、インクルージョンがないこと。 (2)クラック、空洞のないこと。	X線透過法(直角2方向)	各20本	良好	良好	全数合格	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770kgf/cm ² (76MPa)以上であること。	内圧加圧法	各3本	1195 kgf/cm ² (117.2MPa) 1205 kgf/cm ² (118.2MPa) 1235 kgf/cm ² (121.1MPa)	1335 kgf/cm ² (130.9MPa) 1285 kgf/cm ² (126.0MPa) 1330 kgf/cm ² (130.4MPa)	合格	1250 kgf/cm ² (122.6MPa) 1290 kgf/cm ² (126.5MPa) 1275 kgf/cm ² (125.0MPa)	合格
	4. 引張試験 引張強さ(室温)	破断荷重が315kgf(3089N)以上であること。	引張試験法	各3本	423.7 kgf (4155.1N) 486.0 kgf (4766.0N) 487.3 kgf (4778.8N)	491.4 kgf (4819.0N) 508.6 kgf (4987.7N) 494.7 kgf (4851.3N)	合格	495.8 kgf (4862.1N) 495.1 kgf (4855.3N) 500.0 kgf (4903.3N)	合格
	5. 断面金相試験	溶け込みが被覆管肉厚以上であること。 (100% =被覆管肉厚)	顕微鏡法	各3本	124 %	128 %	合格	127 %	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

下部端栓番号の刻印は、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にて行う。

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34個の下部端栓を収納できるマガジンを使用している。処理能力は、1日約350個程度であり、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。

今回刻印の刻印条件を以下に示す。

- ・レーザランプ電流 : 1回目 16A , 2回目 16A
- ・線速度 : 1回目 50mm/s , 2回目 20mm/s
- ・Qスイッチ周波数 : 1回目 2KHz , 2回目 20KHz

なお、第6次取替燃料集合体用燃料要素の下部端栓番号は、「品質保証記録管理要領書」等に基づき、その1燃料集合体用のPNC1520材は「060001～」、SUS316相当材は「061001～」、その2燃料集合体用のSUS316材は「061400～」とする。

3.1.3 作業実績

下部端栓番号の刻印は、その1燃料集合体用から開始し、下部端栓の使用前検査及び下部端栓溶接の各進捗状況に対応させ、その2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。

その1燃料集合体用の下部端栓番号刻印は、平成6年1月から同年2月にかけて1日平均、約200個で述べ5日間で実施した。その1燃料集合体8体分（PNC1520材5体分、SUS316相当材3体分）を製造するため、燃料要素加工工程で必要な下部端栓付被覆管は1,091本（PNC1520材694、SUS316相当材397）であるが、下部端栓溶接の不合格品による不足分が発生したため、最終的に4個（PNC1520材2個、SUS316相当材2個）多い1,095個の刻印を行った。

その2燃料集合体用の下部端栓番号刻印は、平成6年2月から同年4月と、平成8年1月から同年3月にかけて、1日平均、約330個で述べ15日間で実施した。

その2燃料集合体38体分（SUS316相当材）を製造するため、燃料要素加工工程で必要な下部端栓付被覆管は4,938本であるが、その1燃料集合体用と同様に、下部端栓溶接の不合格品による不足分として、最終的に14個多い4,952個の刻印を行った。

下部端栓の総受検数量6,136個のうち、6,047個の刻印を実施した結果、不良品は発生しなかった。

なお、下部端栓の受検数量と刻印数量の差89個は、下部端栓溶接工程歩留り分として約0.5%をみていたが、0.3%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	月	下部端栓番号刻印数量 (個)		
		その1用		その2用
		PNC1520材	SUS316相当材	SUS316相当材
平成6年	1	694	—	—
	2	2	399	3,773
	3	—	—	258
	4	—	—	11
平成8年	1	—	—	624
	2	—	—	284
	3	—	—	2
小計		696	399	4,952
		1,095		
合計		6,047		

3.2 下部端栓溶接

3.2.1 目的

高速実験炉「常陽」照射炉心燃料集合体「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覆管を、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、被覆管ローディング部、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本収納される被覆管を1本ずつ自動的に取り出し、端栓マガジンに最大34個収納される下部端栓を被覆管の先端に挿入し、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、下部端栓及び被覆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用の微調整を行い、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、被覆管及び下部端栓の「科技厅」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の各進捗状況に対応させ、その1燃料集合体用、その2燃料集合体用の順に実施した。なお、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あり、原則として1日の溶接で製作した製品全てを1溶接バッチとしている。

また、その1、その2燃料集合体用の溶接条件は、全て同一のであり1日の溶接量は約120本程度であった。

その1燃料集合体用の下部端栓溶接は、平成6年1月から同年2月にかけてPNC1520材が7溶接バッチ、SUS316相当材が3溶接バッチの、計10溶接バッチで実施した。

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1,095本の溶接を行った。

その2燃料集合体用の下部端栓溶接は、平成6年2月から同年4月と平成8年1月から同年3月に、SUS316相当材46溶接バッチであった。

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4,952本であった。

下部端栓溶接では、総受検数量6,136本のうち6,047本について、延べ

56溶接バッチで実施した。結果としては、18本の不良品が発生し、不良率は約0.3%であった。詳細は、表-9の不合格品発生状況一覧を参照のこと。

表-6 下部端栓溶接作業実績

年	月	下部端栓溶接処理量 (本数及びバッチ数)		
		その1用		その2用
		PNC1520材	SUS316相当材	SUS316相当材
平成6年	1	489本 4バッチ	—	—
	2	207本 3バッチ	399本 3バッチ	513本 5バッチ
	3	—	—	2,932本 22バッチ
	4	—	—	597本 6バッチ
平成8年	1	—	—	908本 12バッチ
	2	—	—	2本 1バッチ
小計		696本	399本	4,952本
		1,095本		
合計		6,047本		

4. 試験検査

4.1 目的

高速実験炉「常陽」照射炉心燃料集合体「品質管理要領書（集合体編）」に基づき、第6次取替炉心燃料集合体用に加工した下部端栓付被覆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

各試験検査は、平成6年1月から同年5月までと、平成8年2月から同年4月にかけて実施した。各月ごとの試験検査作業実績を表-7に示す。

また、各試験検査項目及び規格については表-8に示す。

なお、表-7中における、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 試験検査作業実績

試験検査項目		PNC1520材						SUS316相当材						
		平成5年度			平成6年度			平成7年度			平成8年度			
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	
溶接部溶け込み確認検査 (バッチ)	その1	1	2											
	その2		1							3	1			
溶接部外観検査 (本)	その1	348	348											
	その2		399							845	63	2		
溶接部寸法検査 (本)	その1	348	348											
	その2		189	2333	1520					845	63	2		
X線透過試験 (本)	その1	100	596											
	その2		399							668	240	2		
フィルム第1判定 (本)	その1	75	621											
	その2		399							351	557	2		
フィルム第2判定 (本)	その1	75	621											
	その2		75	324						226	682	2		
最終外観検査 (本)	その1		696											
	その2			399									910	

⇔ : 「もんじゅ」第1回取替炉心燃料集合体用の溶接加工実施のため一時中断

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。 ・著しい着色のないこと。 ・溶接ビード部に汚れがなく清浄であること。 ・著しい肩だれのないこと。 ・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。 ・溶け込みが被覆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"> ・溶け込みが被覆管肉厚以上であること。
寸法検査	ビード部外径	・ $\phi \leq 5.65 \text{ mm}$
	下部端栓取付角度	・ $\leq 25'$

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。

その1用のPNC1520材で2本, SUS316相当材で2本の計4本、その2が14本不合格となり、不合格率は、その1のPNC1520材が約0.3%, SUS316相当材が約0.5%であり、その1全体としては約0.4%であった。その2は約0.3%であった。

表－9 不合格品発生状況一覧

燃料集合体		発 生 理 由	本数
その1	PNC1520 材	溶接部外観検査不合格 (溶接ビード打傷)	1本
		最終外観検査不合格 (被覆管部の曲がり $\geq 0.25 \text{ mm}$)	1本
	SUS316 相当材	溶接部外観検査不合格 (下部端栓部スパッタ)	2本
その2	SUS316 相当材	溶接部外観検査不合格 (下部端栓部スパッタ)	11本
		溶接部外観検査不合格 (溶接ビード巾不均一)	2本
		フィルム第1,第2判定不合格 (インクルージョン)	1本

4.3 試験検査の方法及び結果

4.3.1 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、その1燃料集合体用のPNC1520材で3試料、SUS316相当材で1試料の計4試料、その2燃料集合体用で13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覆管の嵌合部における、溶け込み深さ及び被覆管肉厚を求め、被覆管肉厚に対する溶け込み深さを、百分率で示したものである。

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「被覆管肉厚相当以上」を満足していた。

4.3.2 溶接部外観検査

(1) 検査方法

TIG溶接した下部端栓付被覆管の溶接部を、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

その1燃料集合体用では、「溶接ビード打傷」が1本、「下部端栓部スパッタ」が2本で計3本、その2燃料集合体用では、「下部端栓部スパッタ」が11本、「溶接ビード巾不均一」が2本で、計13本の不合格が確認された。(表-9参照)

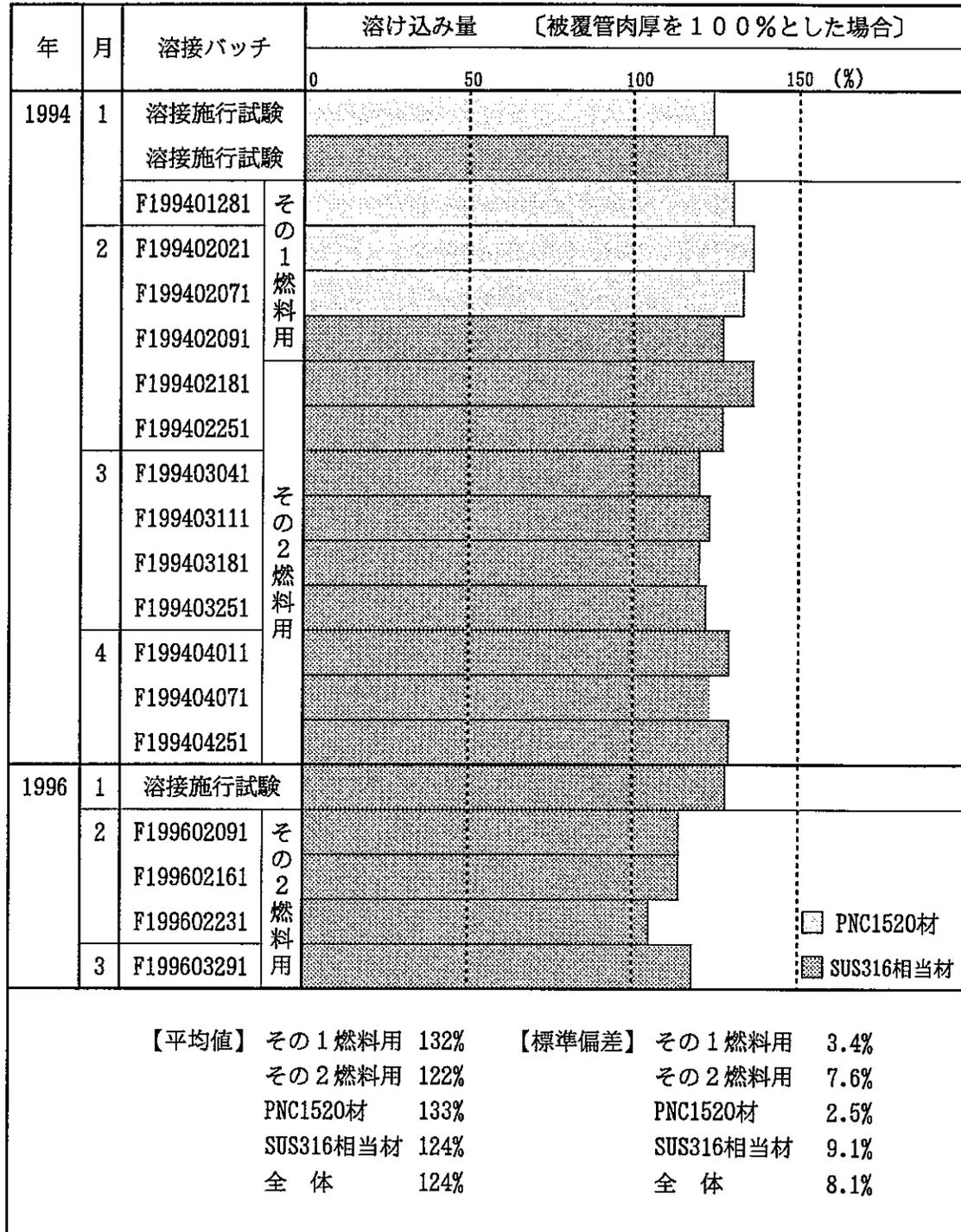


図-3 溶接バッチごとの溶け込み量

4.3.3 溶接部寸法検査

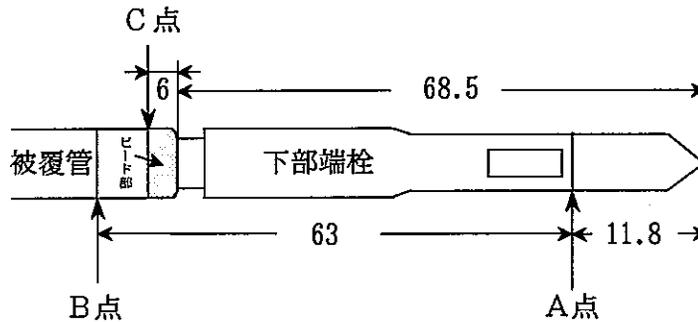
(1) 検査方法

端栓取付角度検査装置により、下部端栓付被覆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本収納数できる試料供給部より搬送された下部端栓付被覆管を、回転させることにより図-4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-5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、算出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(φ5.65mm)でも確認し、ダブルチェックを実施する。

・測定位置 単位 (mm)



・端栓取付角度測定

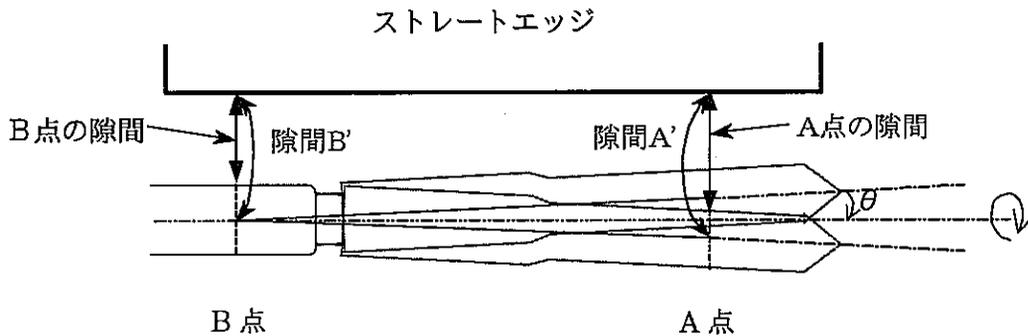


図-4 下部端栓付被覆端栓取付角度及び溶接ビード外径測定位置

・算出フロー

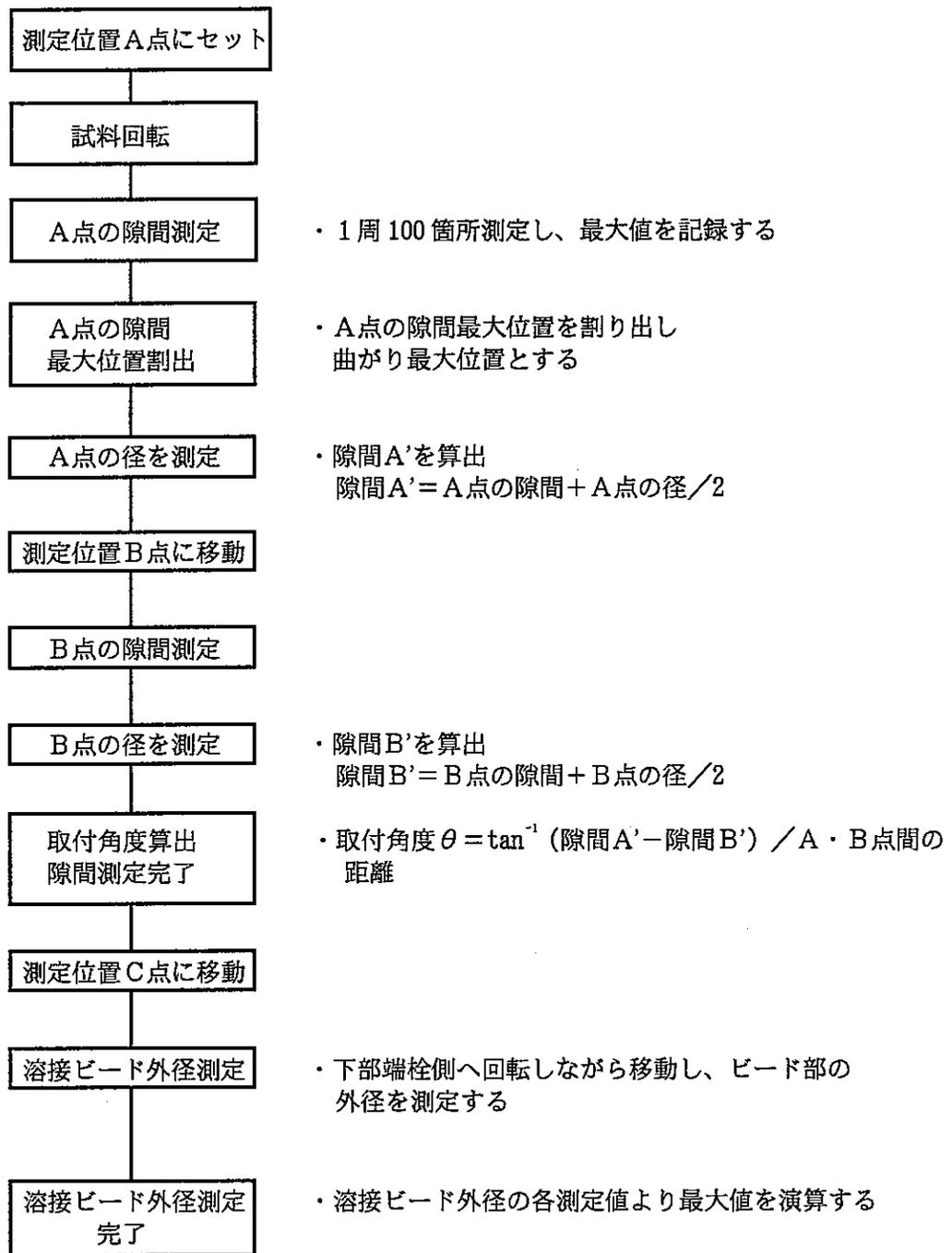


図-5 下部端栓付被覆管の端栓取付角度及び溶接ビード外径算出フロー

(2) 検査結果

端栓取付角度検査結果を図-6, 7, 8, 9, 10に、溶接ビード外径検査結果を図-11, 12, 13, 14, 15に示す。

全製品のうち端栓取付角度検査及び溶接ビード外径検査において、不合格となるものは、認められなかった。

しかし、図-14のビード外径検査結果【その2燃料集合体用 (SUS316 相当材)】から分かるように、被覆管外径 (標準値: $\phi 5.5$ mm) より明らかに小さい値の製品が1本認められた。これは、溶接部外観検査において「溶接ビード巾不均一」で不合格となったものであり、下部端栓溶接不良により生じたものであった。

(表-9参照)

検査結果を、その1燃料集合体用とその2燃料集合体用に分けて比較すると、端栓取付角度検査では、図-6, 7, 8, 9に示すとおり、平均値はその1燃料集合体用のPNC1520材で6'38", SUS316相当材で6'31"、標準偏差はそれぞれ2'14", 2'09"であり、その1燃料集合体用全体の平均値は6'38"、標準偏差は2'14"であった。また、その2燃料集合体用の平均値は6'05"、標準偏差は1'56"であった。

溶接ビード外径検査では、図-11, 12, 13, 14に示すとおり、平均値はその1燃料集合体用のPNC1520材で $\phi 5.600$ mm, SUS316相当材で $\phi 5.603$ mm、標準偏差はそれぞれ0.017 mm, 0.015 mmであり、その1燃料集合体用全体では平均値は $\phi 5.601$ mm、標準偏差は0.016 mmであった。また、その2燃料集合体用の平均値は $\phi 5.597$ mm、標準偏差は0.014 mmであった。

さらに、「常陽」第6次取替燃料集合体で使用した下部端栓と被覆管の母材の材質で分けて比較すると、端栓取付角度検査では、図-6, 10に示すとおり、平均値はPNC1520材で6'38", SUS316相当材で6'07"であり、標準偏差はそれぞれ2'14", 1'57"であった。

溶接ビード外径検査では、図-11, 15に示すとおり、平均値はPNC1520材で $\phi 5.600$ mm, SUS316相当材で $\phi 5.597$ mmであり、標準偏差はそれぞれ0.017 mm, 0.014 mmであった。

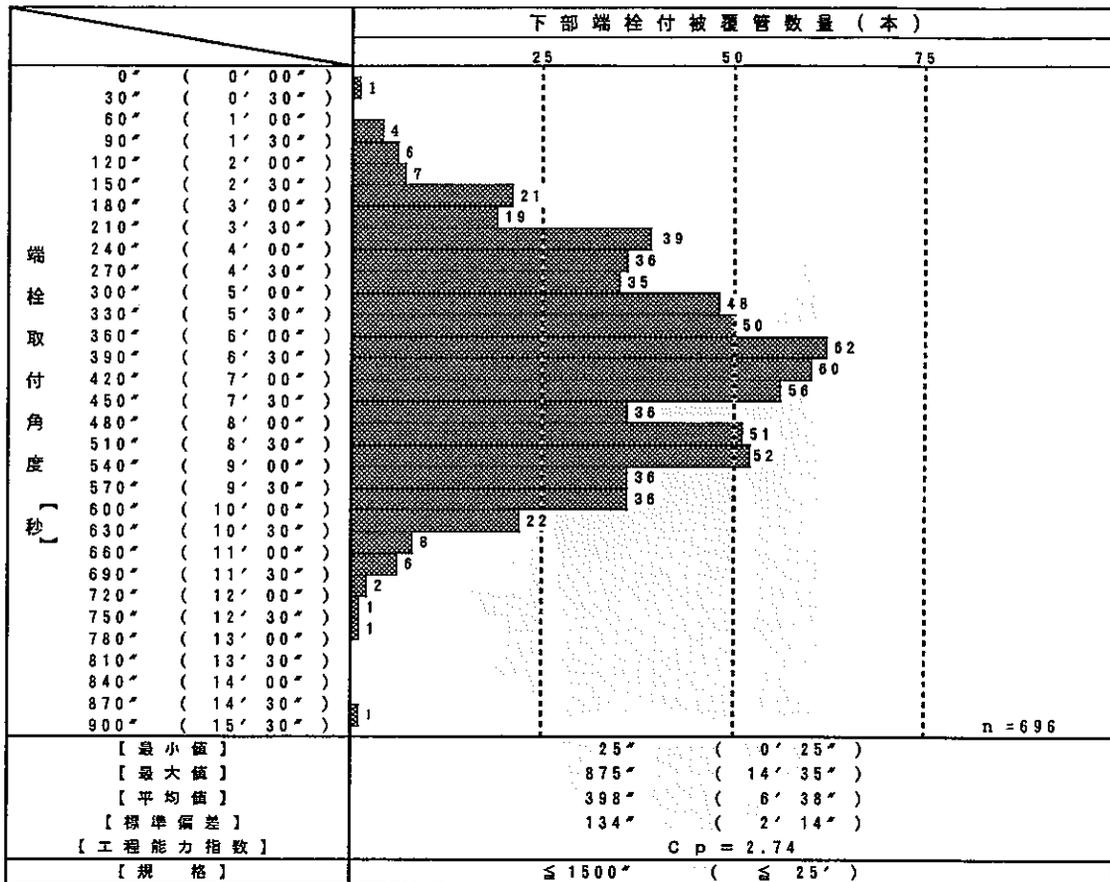


図-6 端栓取付角度検査結果【その1燃料集合体用 (PNC1520材)】

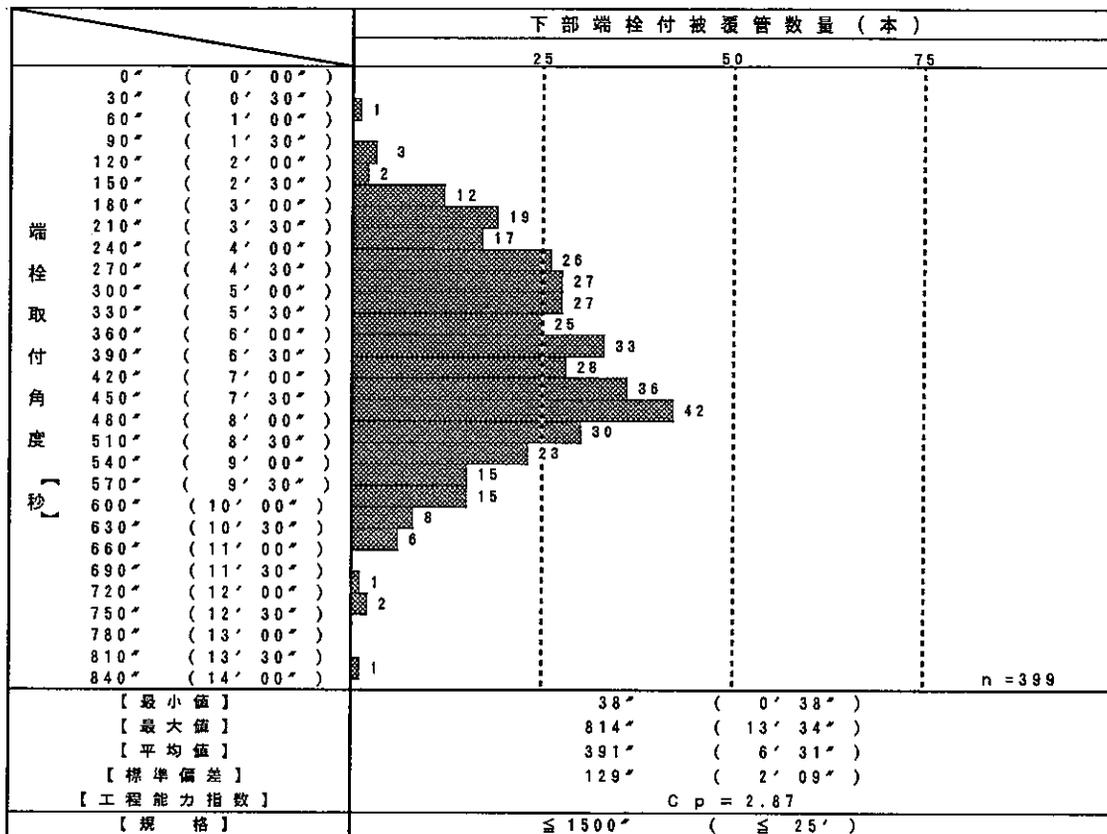


図-7 端栓取付角度検査結果【その1燃料集合体用 (SUS316相当材)】

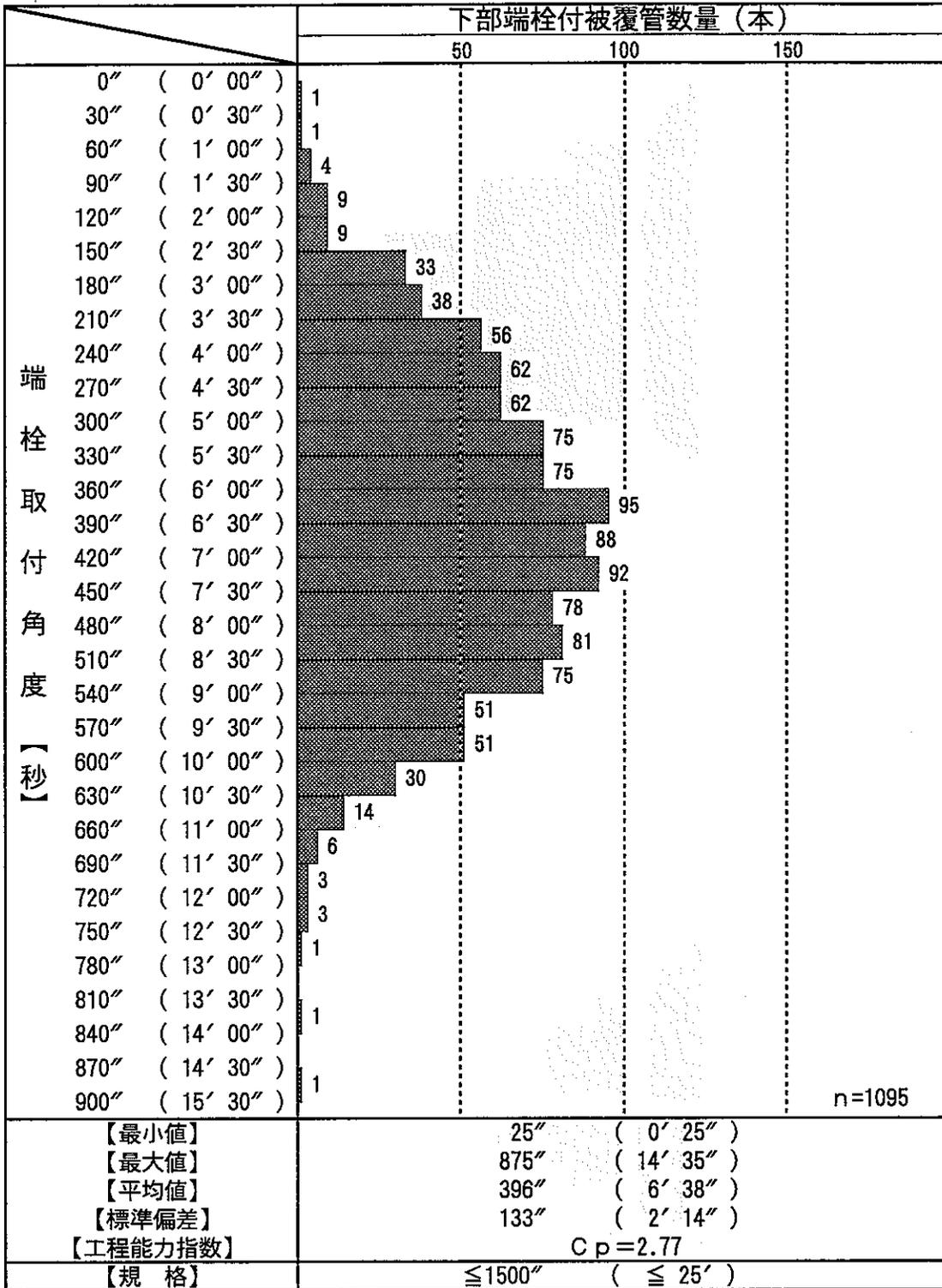


図-8 端栓取付角度検査結果【その1 燃料集合体用(PNC1520 材,SUS316 相当材)】

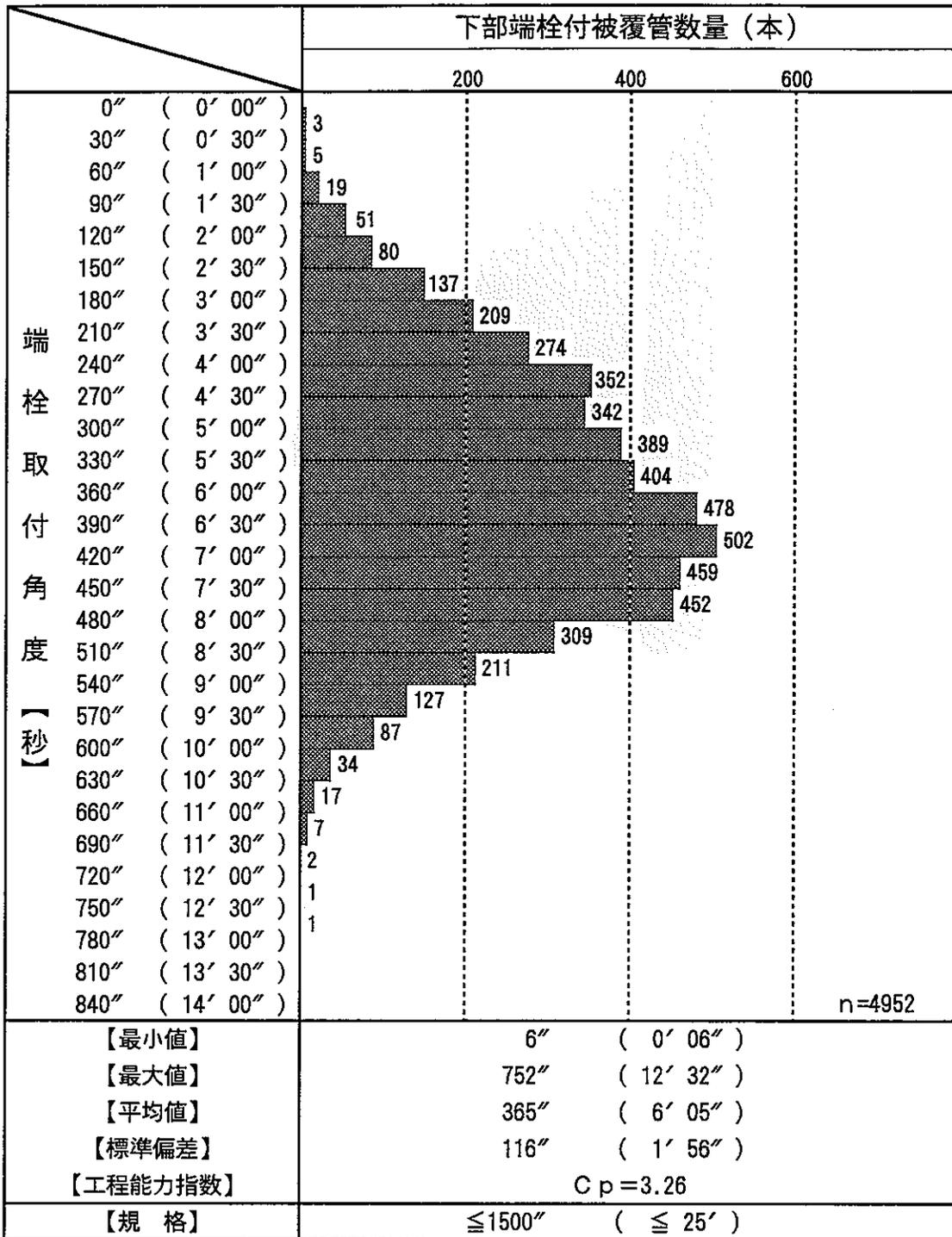


図-9 端栓取付角度検査結果【その2 燃料集合体用 (SUS316相当材)】

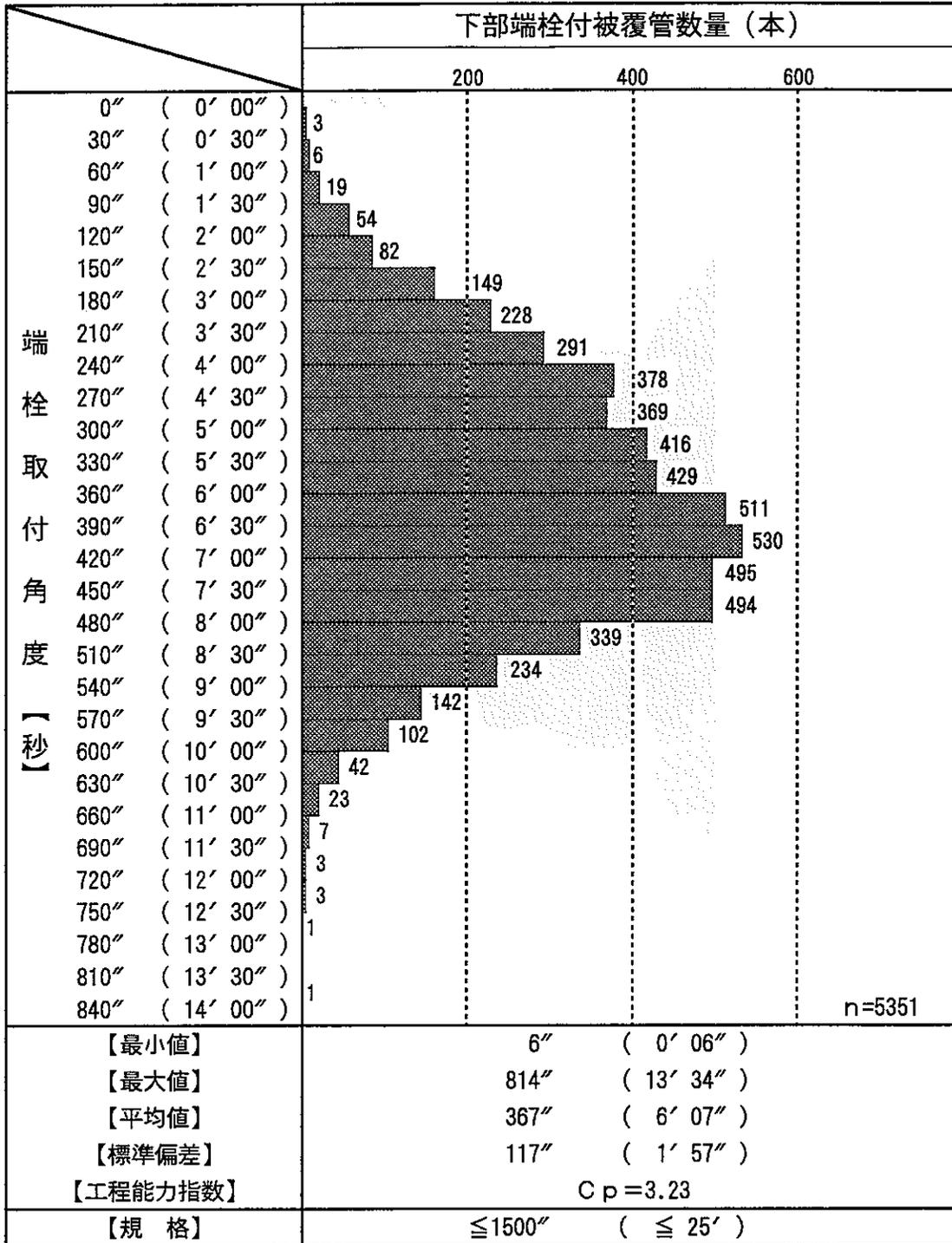


図-10 端栓取付角度検査結果【その1, 2燃料集合体用 (SUS316相当材)】

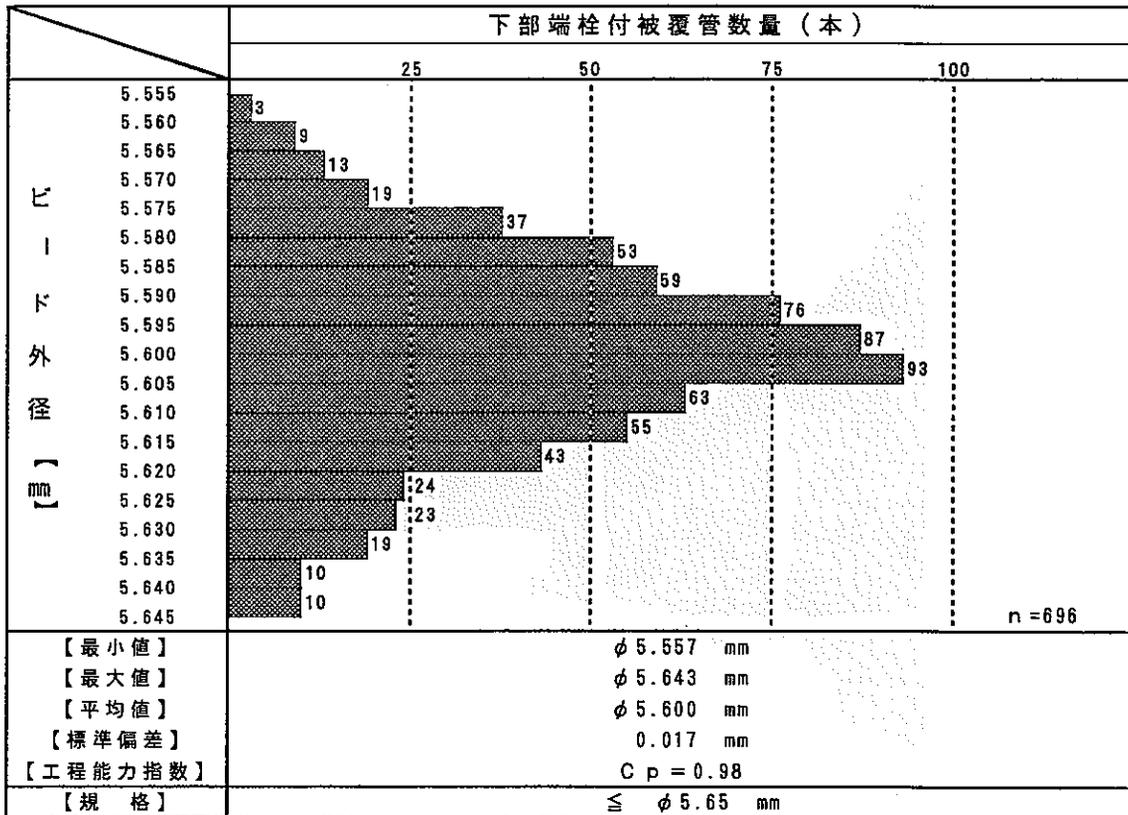


図-11 ビード外径検査結果【その1燃料集合体用 (PNC1520材)】

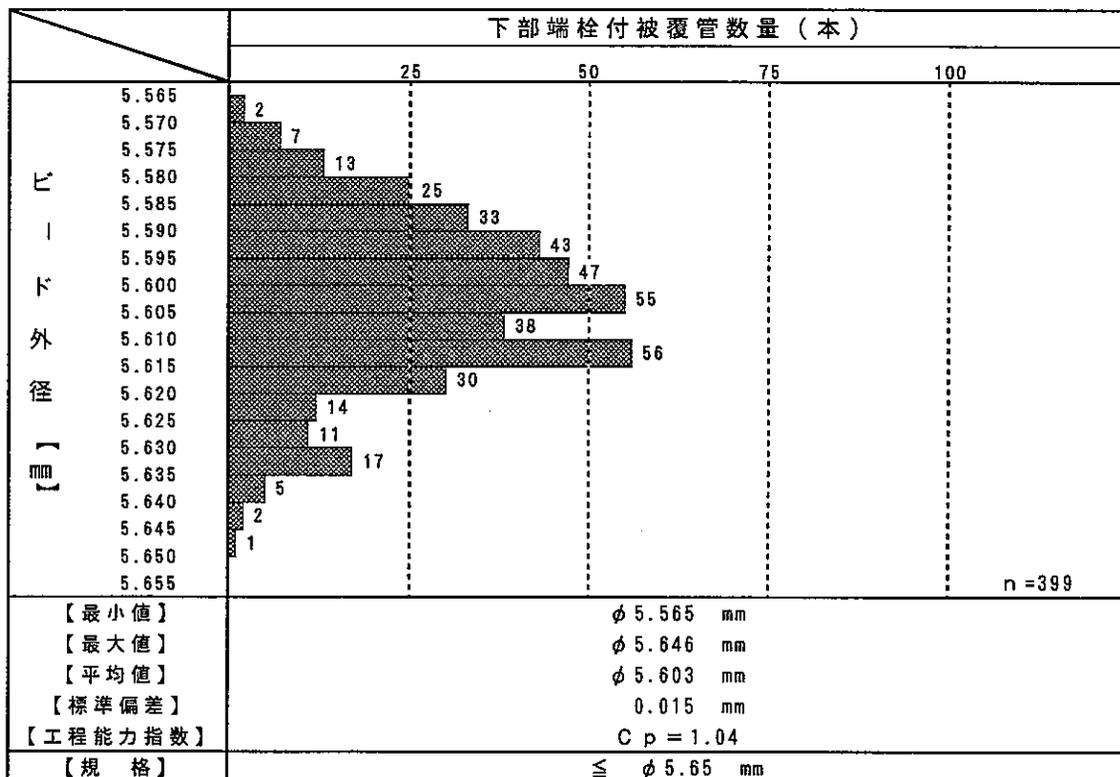


図-12 ビード外径検査結果【その1燃料集合体用 (SUS316相当材)】

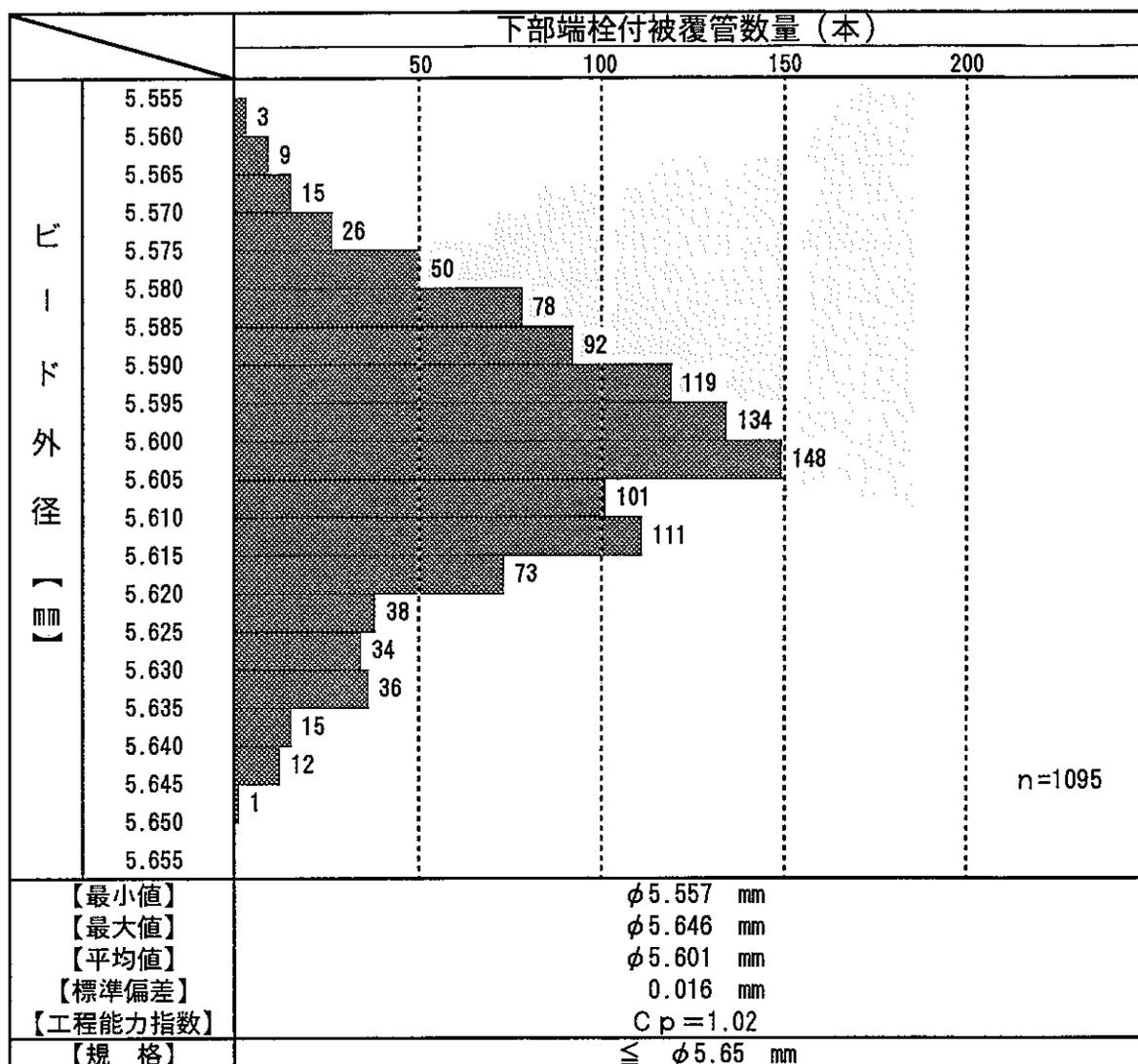


図-13 ビード外径検査結果【その1 燃料集合体用(PNC1520材, SUS316相当材)】

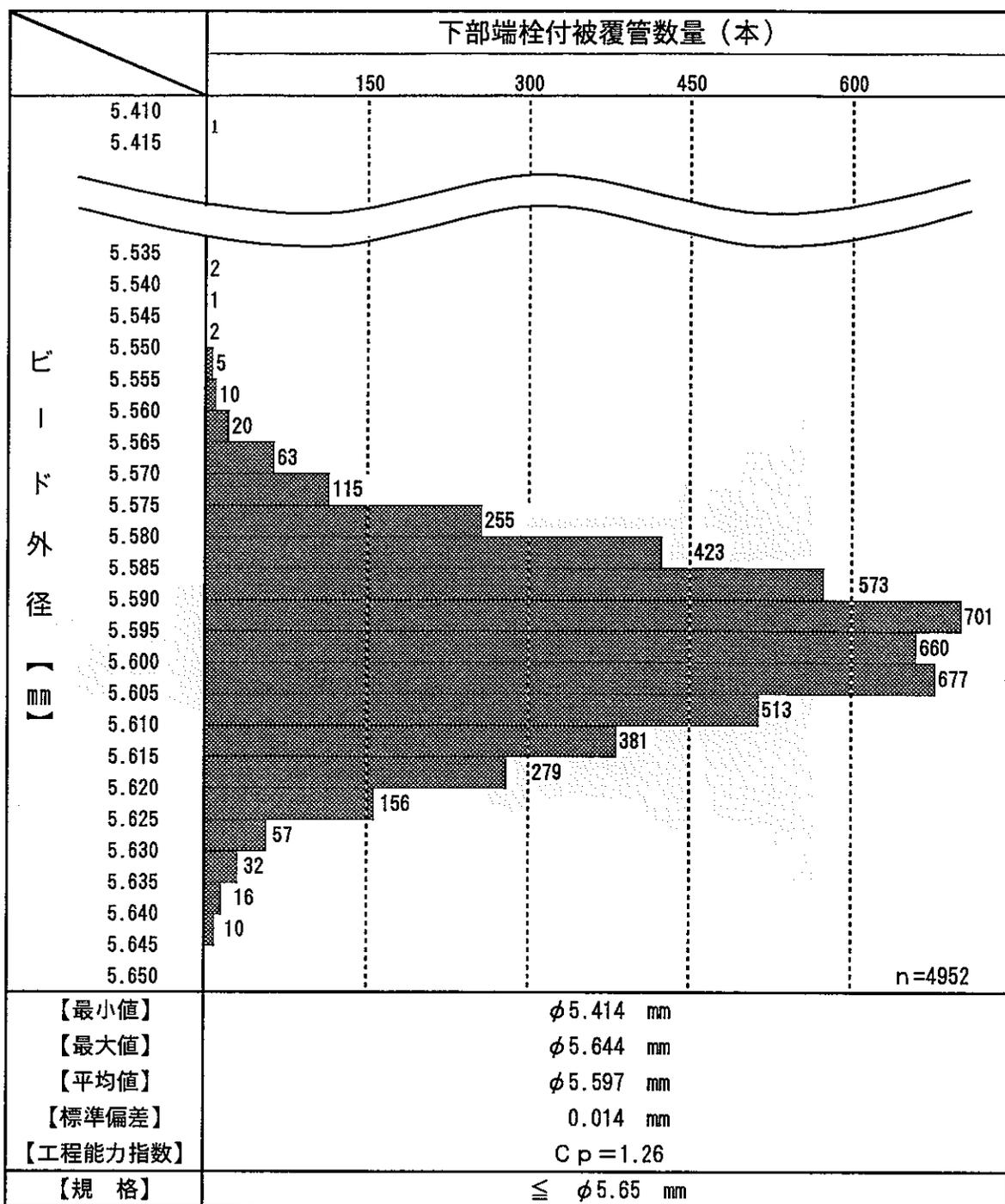


図-14 ビード外径検査結果【その2燃料集合体用 (SUS316相当材)】

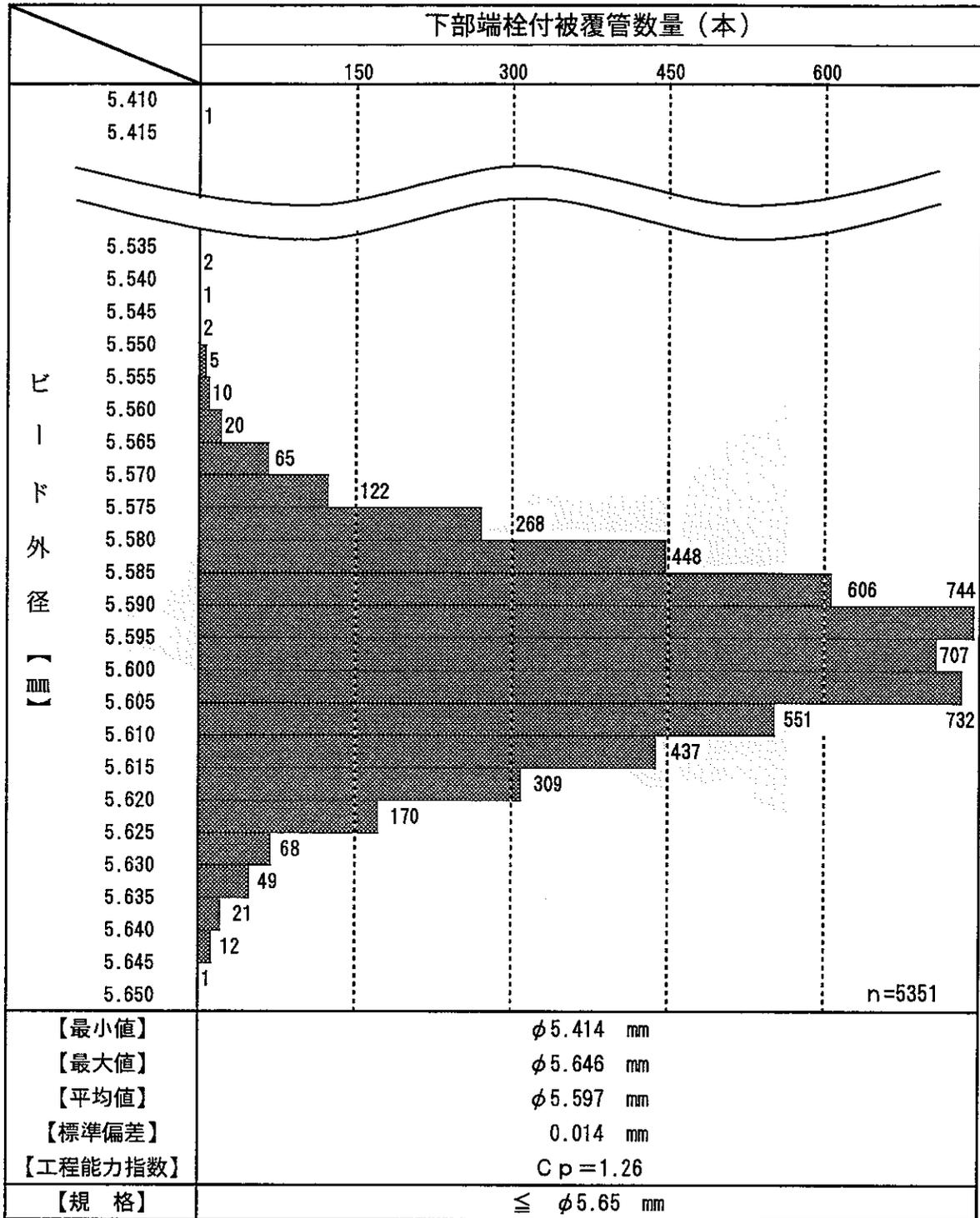


図-15 ビード外径検査結果【その1, 2燃料集合体用 (SUS316相当材)】

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覆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、溶接部を 0° ・ 90° の2方向から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 Na7 (S)” ペネトラメータの1 T ($\phi 0.2$ 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、自動現像機により、フィルムの現像処理を重ねるうちに、成分が溶出し徐々に現像作用が増加することと、従来から使用していた厚さ0.05 mm (BACK) の増感紙の製造中止に伴い、平成8年2月以降（燃料要素番号：065442）からは、0.10 mm (BACK) の増感紙に変更したことによるものである。

X線透過試験においては、表-11に示すとおり、欠陥候補像がその1燃料集合体用でPNC1520材9本、SUS316相当材7本、その2燃料集合体用では102本に現れたため再撮影の対象となった。

これはフィルム上 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一点程度現出したためである。この陰影については、「JIS Z 3106 - 1971 に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、未だ原因については特定されていない。

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、フィルム上の大きな白点等で、判定用フィルムとして使用できないものが不良フィルムとなり、その1燃料集合体用で3回、その2燃料集合体用で28回が再撮影する結果となった。

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線が得られなかったためと思われ、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る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-10 下部端栓付被覆管のX線撮影条件

		その1 燃料集合体用		その2 燃料集合体用
		PNC1520 材	SUS316 材	SUS316 材
燃料要素番号		060001~060696	061001~061399	061400~066351
撮影条件	焦点間距離	120 cm	120 cm	120 cm
	管電圧	135 kV	135 kV	135 kV
	管電流	10 mA	10 mA	10 mA
	露出時間	10分40秒 ~ 11分10秒	10分50秒 ~ 11分00秒	9分50秒 ~ 12分10秒
	増感紙種類	(Pb) 0.03 mm 0.05 mm	(Pb) 0.03 mm 0.05 mm	(Pb) 0.03 mm *0.10 mm
使用フィルム		フジ #25	フジ #25	フジ #25
現像条件	現像温度	23 °C	23 °C	23 °C
	定着温度	31 °C	31 °C	31 °C
	処理時間	11 分	11 分	11 分

表-11 下部端栓付被覆管のX線撮影状況

燃料		区分	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
その1 燃料集合体	PNC1520 材		29回	9回 (9本)	31 (%)	0回	0 (%)
	SUS316 材		16回	4回 (7本)	25 (%)	3回	19 (%)
その2 燃料集合体	SUS316 材		207回	70回 (102本)	34 (%)	28回	14 (%)

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、下部端栓付被覆管の溶接部(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、装置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

その2燃料集合体用で、規格を外れるインクルージョン(タングステン電極の巻き込みと思われるもの)が、1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テンとアイゲージ(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、その2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1本に同様(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。(表-9参照)

4.3.6 最終外観検査

(1) 検査方法

最終外観検査として出荷工程の前に、全製品の被覆管部、端栓部、溶接部を目視及び石定盤により、判定基準を超える傷、曲がり等がないことを確認する。

(2) 検査結果

その1燃料集合体用のPNC1520材で、被覆管部の曲がり量が0.25mmを超えたものが1本確認され不合格となった。なお、この被覆管部の曲がり量は、下部端栓溶接時の取扱い中に発生したものであった。(表-9参照)

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

管口マスク取付けは、図-16に示すように作業員が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300℃で加熱時間は1本当たり25秒である。

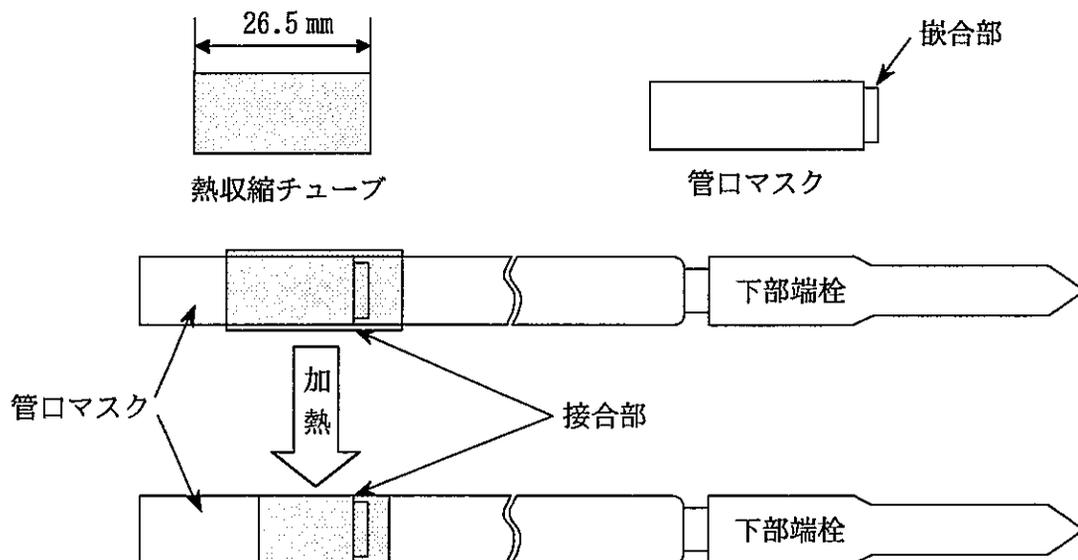


図-16 管口マスク取付け方法の概略

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（720本）ごとに行った。

なお、取付け数量は、その1燃料集合体用1,091本（PNC1520材694本、SUS316相当材397本）、その2燃料集合体用4,938本であった。

5.2 下部端栓付被覆管のパレタイズ

5.2.1 目的

管口マスクを取付けた製品を、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、管口マスクを取付けた製品を、本検査施設部材収納容器から燃料要素加工工程専用容器（収納本数240本/24本/1パレット）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、その1燃料集合体用が1,091本（PNC1520材694本、SUS316相当材397本）、その2燃料集合体用が4,938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覆管及び上部端栓、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。

「常陽」照射炉心第6次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、その1燃料集合体用の1,091本については、平成6年5月25日と、平成6年6月2日の2回実施した。

また、その2燃料集合体用の4,938本については、第3回目の平成6年11月4日から平成8年7月18日において8回実施した。

表-12 下部端栓付被覆管輸送実績

集合体区分	輸送回数	輸送日 (出荷日)	出荷数量	材料区分	集合体区分別 本数(合計)
その1用	1	平成6.5.25	694本	PNC1520材	1,091本
	2	平成6.10.20	397本	SUS316相当材	
その2用	3	平成6.11.4	272本	SUS316相当材	4,938本
	4	平成8.5.7	720本		
	5	平成8.5.22	720本		
	6	平成8.6.11	720本		
	7	平成8.6.20	720本		
	8	平成8.6.28	720本		
	9	平成8.7.9	720本		
	10	平成8.7.18	346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をもとに、「その1」と「その2」及び材料別（PNC1520材とSUS316相当材）に、統計的手法を用い比較してまとめたものを以下に記載する。

6.1 溶け込み確認

溶け込み量については、4.3.1項でも述べているように全て100%以上を示している。平均値についても、全体で124%と溶け込み状態も良好なものとなっている。

（図-3参照）

また、標準偏差については、サンプル数が異なるものの、その1燃料集合体用で約3.4%、その2燃料集合体用で約7.6%、全体においても、約8.1%とバラツキは小さく安定した溶接状態であると思われる。

さらに、材料別の標準偏差を比較すると、PNC1520材は約2.5%、SUS316相当材は、約9.1%で安定した溶接状態であると思われる。

6.2 溶接部寸法検査

6.2.1 端栓取付角度検査

端栓取付角度検査については、測定値の分布及び変動係数（標準偏差を平均値で割った量で相対的なバラツキを示すもの）を、測定値の分布においては、図6～図10に示すとおり、多少広い範囲で分布しておりバラツキが若干大きいことがわかる。

変動係数においては、その1燃料集合体用のPNC1520材で34%、SUS316相当材で33%であり、全体では34%であった。また、その2燃料集合体についても、32%とそれぞれ若干大きめの値を示した。

6.2.2 溶接ビード外径検査

図11～図15に示すビード外径検査結果から、その1及びその2燃料集合体用に分けて測定値の分布状態を見ると、その1燃料集合体のSUS316相当材を除き正規分布に等しい形を示している。

なお、ビード外径平均値と被覆管ノミナル外径（標準値： $\phi 5.5\text{mm}$ ）から、溶接ビードの盛り上りを求めると、その1及びその2燃料集合体用ともに、約0.05mmであった。

また、ビード外径と被覆管標準外径との差（溶接ビード盛り上り寸法）を用いて変

動係数を求めると、その1燃料集合体用のPNC1520材は17%、SUS316相当材が15%となり、全体では15%であった。

その2燃料集合体用は、14%であり両燃料集合体用とも多少バラツキがあった。

6.2.3 工程能力指数による溶接部の評価

溶接工程における溶接部評価の指標の一部として、端栓取付角度と溶接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 C_p を用いて評価してみた。

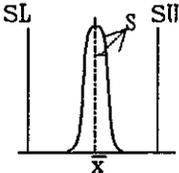
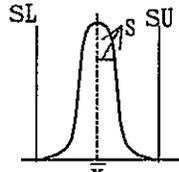
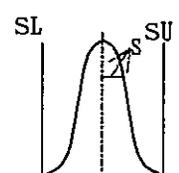
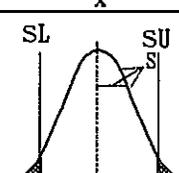
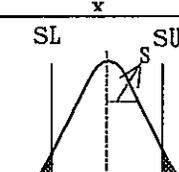
端栓取付角度の工程能力指数は、その1燃料集合体用のPNC1520材が2.74、SUS316相当材が2.87、全体では2.77であった。その2燃料集合体用については、3.23となり両燃料集合体用とも理想である $C_p=1.33$ より大きく、工程能力(規格に対する製品の持つ特性値の分布：通常、正規分布の場合は平均値 $\pm 3\sigma$)は十分過ぎるくらいであることが分かる。

ビード外径の工程能力指数は、その1燃料集合体用のPNC1520材が0.98、SUS316相当材は1.04で、全体では1.02であった。その2燃料集合体用については、1.26となり、その2燃料集合体用については理想である $C_p=1.33$ に近い状態ではあるが、その1燃料集合体用は、規格は満足しているものの、分布に多少バラツキがあるため、値は低くなっている。

材質別の工程能力指数を比較すると、端栓取付角度ではPNC1520材が2.74、SUS316相当材が3.23と、工程能力は十分過ぎるくらいであることが分かる。

また、ビード外径は、PNC1520材が0.98、SUS316相当材が1.26となり、SUS316相当材は理想に近い状態となっているが、PNC1520材は燃料集合体ごとに比較したものと同様、分布に多少バラツキがあったため、値が低くなっている。

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
$Cp \geq 1.67$		工程能力は十分すぎる。	製品のばらつきが若干大きくなっても心配ない。管理の簡素化やコスト低減の方法などを考える。
$1.67 > Cp \geq 1.33$		工程能力は十分である。	理想的な状態なので維持する。
$1.33 > Cp \geq 1.00$		工程能力は十分とはいえないが、まずまずである。	工程能力をしっかり行ない管理状態に保つ。Cpが1に近づくとも不良品発生のおそれがあるから、必要に応じて処置をとる。
$1.00 > Cp \geq 0.67$		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。
$0.67 > Cp$		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

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

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

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

7. 本キャンペーン中における問題点とその対策

7.1 下部端栓部スパッタについて

不合格品発生状況(4.2.2)の項で、不合格となった本数の多かった項目であり、キャンペーンの途中で対策を行った。

スパッタは、アーク発生の瞬間に溶接部以外の場所(下部端栓の首部)が、溶けた状態になるものである。このため、外観検査項目の「溶接部に汚れがなく、清浄であること」の範囲外とみなし不合格となる。

7.2 原因

- ① 本溶接に使用している電極(トリウム入りタングステン)は、1本当りの溶接回数が多くなると、アークが発生し難くなる。
- ② 溶接開始時の電極位置決めの時、電極を下部端栓首部側にセットしている。

7.3 対策

- ① 溶接終了後のチャートを確認し、溶接電圧が上昇してきたら早めに新しい電極に交換するようにした。
- ② 電極と溶接部の距離(ギャップA)を変更した。(対策前 約0.2mm,対策後 約0.1mm)
- ③ 電極の位置決めは、図-17のようにツバ部のBからCの間(約0.25mm)で行っていたが、図-18のように、端栓のツバ部より下部端栓首部側に出ない位置に変更した。

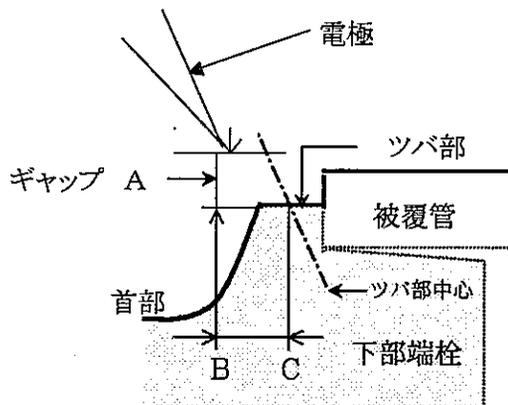


図-17 対策前

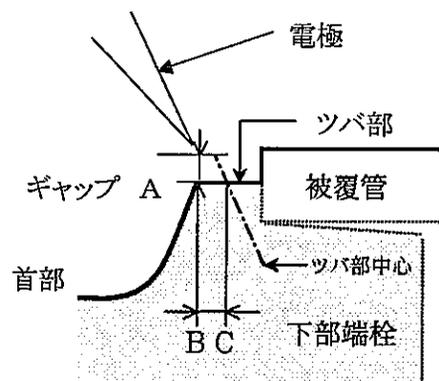


図-18 対策後

7.4 対策後の結果

①及び②の対策後に、1, 234本の溶接を実施したが、7本の発生があり対策前の1, 238本に対し3本の発生より増加してしまった。そこで、さらに対策③を行い3, 385本を溶接した結果、スパッタの発生は皆無となった。

これにより、スパッタは、電極の位置が端栓のツバ部から端栓側にセットした場合に、発生すると判断される。