

「もんじゅ」炉心燃料用端栓（下部）の溶接部
仕様緩和に関する確認試験結果報告書
(試験報告)

1999年9月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

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

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

核燃料サイクル開発機構 東海事業所

運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Information Section,

Administration Division,

Tokai Works,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

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

Japan

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

1999

もんじゅ炉心燃料用端栓（下部）の溶接部仕様緩和に関する確認試験結果報告書
（試験報告）

沼田和明*、大谷誠二*、
棚井厚夫**、豊田裕昌**、高橋秀樹**、
後藤達朗**、

要 旨

「もんじゅ」取替炉心燃料集合体用要素部材の購入（第3回購入）において、部材製作の契約メーカーである（株）日立製作所より、生産性向上を目的とする合理化案として、下部端栓・上部端栓・プレナムスプリングの部分的寸法変更の提案がなされた。

この寸法変更が燃料製造工程内の各種設備、装置等との取り合い上及び燃料要素の製品スペック上において、問題とならないかどうかを検討した。

検討の結果、下部端栓及び上部端栓の溶接部寸法の変更提案は、容認できる可能性があるとは判断し、試作品の提供を受け溶接試験等の結果をもって、今回の提案の採用可否を判断することとしたものである。

試験の結果としては、現行の下部端栓の溶接部規格である $R \leq 0.03$ mm（嵌合部の曲率半径）・ $\phi 5.53 \pm 0.01$ mm（嵌合部の外径）を $R \leq 0.05$ mm・ $\phi 5.53 \pm 0.02$ mmに変更しても溶接性及び溶接部の健全性には問題ないことを確認した。

本報告書は、提供を受けた中の下部端栓について、溶接及び各種試験を実施した結果を報告するものである。

* 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

目 次

1. 目的	1
2. 提案寸法変更部及び規格	1
2.1 提供品の寸法規格等	1
2.2 提供品の寸法検査	2
3. 試験・検査	3
3.1 試験・検査の概要	3
3.2 試験・検査準備	5
3.2.1 被ふく管の選定及び切断	5
3.2.2 寸法確認（端栓の嵌合部と被ふく管のギャップについて）	5
3.2.3 提供品への番号刻印	7
3.2.4 溶接	8
3.3 試験・検査方法	9
3.3.1 非破壊検査方法	9
(1) 溶接部外観検査	9
(2) 溶接部寸法検査	9
(3) X線透過試験検査	10
3.3.2 破壊検査方法	10
(1) 内圧破裂試験	11
(2) 引張試験	11
(3) 断面金相試験	12
3.4 試験・検査結果	13
3.4.1 非破壊検査結果	15
(1) 溶接部外観検査	15
(2) 溶接部寸法検査	15
(3) X線透過試験検査	16
3.4.2 破壊検査結果	19
(1) 内圧破裂試験	19
(2) 引張試験	20
(3) 断面金相試験	21

4. まとめ ----- 23

表リスト

表-1 下部端栓の寸法規格 ----- 1
 表-2 寸法検査結果 ----- 2
 表-3 試験・検査工程表 ----- 3
 表-4 下部端栓嵌合部と被ふく管のギャップ寸法結果 ----- 6
 表-5 溶接条件 ----- 8
 表-6 下部端栓溶接部の検査項目 ----- 9
 表-7 X線透過試験検査条件 ----- 10
 表-8 下部端栓溶接部の試験項目 ----- 11
 表-9 非破壊・破壊検査結果一覧表 ----- 13
 表-10 端栓取付角度検査結果 ----- 15
 表-11 溶接部ビード外径検査結果 ----- 16
 表-12 溶接部ビード盛りと変動係数 ----- 16

図リスト

図-1 提供品（下部端栓）の詳細 ----- 1
 図-2 作業フロー ----- 4
 図-3 提供品のギャップ ----- 5
 図-4 被ふく管と提供品溶接後の形状 ----- 10
 図-5 内圧破裂試験片 ----- 11
 図-6 引張試験片 ----- 12
 図-7 断面金相試験片の切断位置 ----- 12
 図-8 断面金相試験片 ----- 12
 図-9 端栓取付角度検査結果 ----- 17
 図-10 溶接部ビード外径検査結果 ----- 18
 図-11 内圧破裂試験結果 ----- 19
 図-12 引張試験結果 ----- 20
 図-13 溶け込み量の測定 ----- 21
 図-14 断面金相試験結果 ----- 22

1. 目的

もんじゅ取替用燃料集合体の燃料要素部材（下部端栓）の生産性向上を図ることを目的として、下部端栓溶接部の寸法の一部見直し提案が、部材製作メーカーである(株)日立製作所よりあった。このため変更提案が燃料製造工程内の設備・装置等の取り合い、燃料製作仕様等に対して問題とならず容認できるかどうか、製作メーカーから提案された下部端栓の試作品（以下、提供品）を用いて溶接及び各種試験を実施し確認する。

2. 提案寸法変更部及び規格

現行の溶接嵌合部の寸法及び公差規格が厳しいため規格内に加工することは、高度な技術力と刃具（バイト）の消耗管理等を必要とし、コスト高になる要因となっている。

これらを改善するために以下の部分について、寸法を変更したものである。

2.1 提供品の寸法規格等

提供品は、嵌合部曲率半径2パラメータと嵌合部外径5パラメータを組合せた寸法からなる下部端栓（試料）が7グループである。ここで、1グループあたりの試料数は、10個である。表-1に下部端栓の寸法規格と図-1に提供品(下部端栓)の詳細を示す。

表-1 下部端栓の寸法規格 (単位mm)

	R (曲率半径)	φ (外径)	グループ
現行	≤0.03	φ5.53±0.01	
提供品	0.03	5.51	① (B-1)
		5.55	② (B-2)
	0.05	5.51	③ (B-3)
		5.52	④ (B-4)
		5.53	⑤ (B-5)
		5.54	⑥ (B-6)
		5.55	⑦ (B-7)

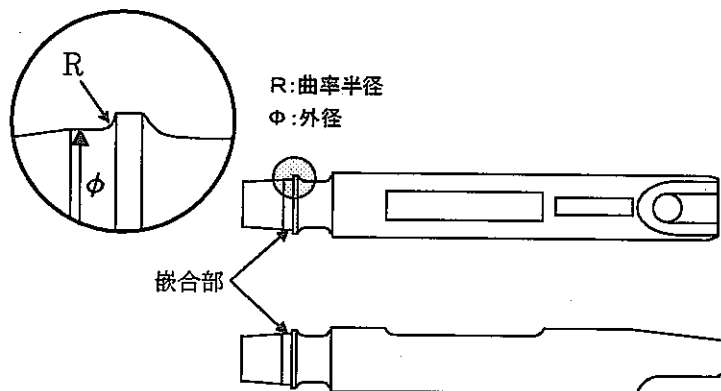


図-1 提供品（下部端栓）の詳細

2.2 提供品の寸法検査

提供品7グループ70試料について、嵌合部外径及び曲率半径がメーカー側の提示した寸法と合致しているか確認するため、嵌合部外径については、ブレードマイクロメータ、曲率半径については、コントレーサを使用して測定した。

結果については、表1と表2に示すように嵌合部外径が約 $\phi 5.51\text{mm}$ 、 $\phi 5.52\text{mm}$ 、 $\phi 5.53\text{mm}$ 、 $\phi 5.54\text{mm}$ 、 $\phi 5.55\text{mm}$ の5種類に、曲率半径がR0.03mmとR0.05mmにほぼメーカーが提示した寸法に製作されていることを確認した。

なお、提供品は、各グループごとにB-1～B-7とした。(表-2参照)

表-2 寸法検査結果

No	グループ	提供品			No	グループ	提供品		
		試料番号	外 径	曲率半径			試料番号	外 径	曲率半径
1	B-1	951301	$\phi 5.512$	R0.03	31	B-4	952501	$\phi 5.520$	R0.05
2		951302	$\phi 5.511$	R0.03	32		952502	$\phi 5.521$	R0.05
3		951303	$\phi 5.511$	R0.03	33		952503	$\phi 5.521$	R0.05
4		951304	$\phi 5.509$	R0.03	34		952504	$\phi 5.520$	R0.05
5		951305	$\phi 5.509$	R0.03	35		952505	$\phi 5.520$	R0.05
6		951306	$\phi 5.510$	R0.03	36		952506	$\phi 5.521$	R0.05
7		951307	$\phi 5.510$	R0.03	37		952507	$\phi 5.520$	R0.05
8		951308	$\phi 5.510$	R0.03	38		952508	$\phi 5.521$	R0.05
9		951309	$\phi 5.509$	R0.03	39		952509	$\phi 5.522$	R0.05
10		951310	$\phi 5.508$	R0.03	40		952510	$\phi 5.521$	R0.05
11	B-2	955301	$\phi 5.551$	R0.03	41	B-5	953501	$\phi 5.532$	R0.05
12		955302	$\phi 5.550$	R0.03	42		953502	$\phi 5.532$	R0.05
13		955303	$\phi 5.550$	R0.03	43		953503	$\phi 5.532$	R0.05
14		955304	$\phi 5.552$	R0.03	44		953504	$\phi 5.532$	R0.05
15		955305	$\phi 5.550$	R0.03	45		953505	$\phi 5.531$	R0.05
16		955306	$\phi 5.551$	R0.03	46		953506	$\phi 5.531$	R0.05
17		955307	$\phi 5.550$	R0.03	47		953507	$\phi 5.532$	R0.05
18		955308	$\phi 5.550$	R0.03	48		953508	$\phi 5.531$	R0.05
19		955309	$\phi 5.551$	R0.03	49		953509	$\phi 5.531$	R0.05
20		955310	$\phi 5.550$	R0.03	50		953510	$\phi 5.542$	R0.05
21	B-3	951501	$\phi 5.508$	R0.05	51	B-6	954501	$\phi 5.542$	R0.05
22		951502	$\phi 5.514$	R0.05	52		954502	$\phi 5.542$	R0.05
23		951503	$\phi 5.509$	R0.05	53		954503	$\phi 5.542$	R0.05
24		951504	$\phi 5.510$	R0.05	54		954504	$\phi 5.540$	R0.05
25		951505	$\phi 5.511$	R0.05	55		954505	$\phi 5.540$	R0.05
26		951506	$\phi 5.510$	R0.05	56		954506	$\phi 5.538$	R0.05
27		951507	$\phi 5.509$	R0.05	57		954507	$\phi 5.543$	R0.05
28		951508	$\phi 5.510$	R0.05	58		954508	$\phi 5.539$	R0.05
29		951509	$\phi 5.511$	R0.05	59		954509	$\phi 5.541$	R0.05
30		951510	$\phi 5.510$	R0.05	60		954510	$\phi 5.540$	R0.05

表-2 寸法検査結果 (続き)

No	グループ	提供品		
		試料番号	外 径	曲率半径
61	B-7	955501	φ 5. 551	R0. 05
62		955502	φ 5. 552	R0. 05
63		955503	φ 5. 551	R0. 05
64		955504	φ 5. 552	R0. 05
65		955505	φ 5. 551	R0. 05
66		955506	φ 5. 551	R0. 05
67		955507	φ 5. 550	R0. 05
68		955508	φ 5. 551	R0. 05
69		955509	φ 5. 549	R0. 05
70		955510	φ 5. 550	R0. 05

3. 試験・検査

3.1 試験・検査の概要

総計70試料の端栓を予め選定された被ふく管に溶接し、品質保証文書 試験・検査要領書(MONJU-RF-QA-10)及び溶接施行試験要領書(MONJU-RF-QA-13)に基づく破壊検査、非破壊検査を実施した。

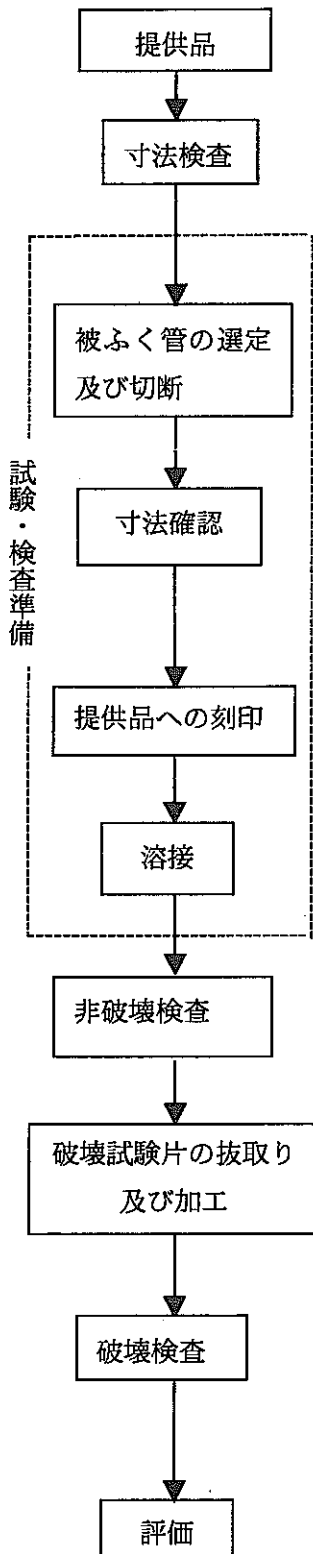
表-3に試験・検査工程、図-2に作業フローを示す。

表-3 試験・検査工程表

項目	年・月	平成9年		平成10年								
		11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
提供品嵌合部外観検査		■										
提供品嵌合部寸法検査			■									
被ふく管選定									■			
番号刻印									■			
溶接(提供品及び被覆管)									■			
非破壊検査										■		
破壊検査										■	■	
まとめ											■	■

非破壊検査：外観検査、端栓取付角度・ビード部外径検査、X線透過試験検査

破壊検査：室温引張試験、内圧破裂試験、溶け込み確認



70 試料（嵌合部外径、曲率半径の寸法パラメータ。1グループ10試料、7グループ）

①嵌合部外径、②曲率半径についてそれぞれブレードマイクロメータ及びコントレーサにより測定する。提供品に対応する被ふく管S材18本、K材18本を用意し、超音波寸法チャート管端から2mmの位置の内面寸法を確認する。

溶接端面の条件を統一するため、製品を半分（約1375mm）に切断し端面仕上り側を使用する。

溶接条件がなるべく一定となるように提供品と被ふく管の寸法を検討、設定する。下部端栓嵌合部の寸法及び被ふく管の内面寸法を基にデータの照合を行う。

提供された70試料について、識別管理するため端栓刻印装置を使用して、6桁の番号を刻印する。

提供品70試料と被ふく管について、TIG溶接を行う。

全試料（70試料）について①X線透過試験、②端栓取付角度・外径検査、③外観検査を行う。

非破壊検査の結果から7グループより、引張試験及び内圧破裂試験用に各3試料、金相試験用に各2試料ずつ抜き取る。抜き取られた破壊検査用試料について規定どおりの寸法に切断する。

抜き取った試料について、①引張試験（室温）、②内圧破裂試験（室温）、③金相試験を行う。

非破壊検査、破壊検査結果について統計的手法を用い、溶接性及び溶接部の健全性について評価を行う。

図-2 作業フロー

3.2 試験・検査準備

3.2.1 被ふく管の選定及び切断

溶接するにあたり溶接装置との取り合い上被ふく管長さは、最低870mmを必要とするため、製品（全長；2750mm）を旋盤により、約1375mm（全長の約半分の長さ）に切断したものを使用することとした。

また、メーカーによる溶接性の差異を確認するために、被ふく管の製造2社（S,K社）より18本ずつ選び、提供品70試料分に対応させた。

選定したS材、K材それぞれの被ふく管について、両管端から2mmの内径変動を超音波寸法チャートにより確認した。

なお、被ふく管端面仕上については、製品の溶接時と条件を同一とするため、メーカーから納入されたものをそのまま使用することとした。（表-4参照）

3.2.2 寸法確認（端栓の嵌合部と被ふく管のギャップについて）

2.2 項（提供品の寸法検査）で調査した端栓の嵌合部外径及び曲率半径と、前項で調査した超音波寸法チャート、端栓の嵌合部径を、被ふく管内径との差（以下ギャップと略する。）がどの程度生じているか算出した。結果を図-3及び表-4に示す。

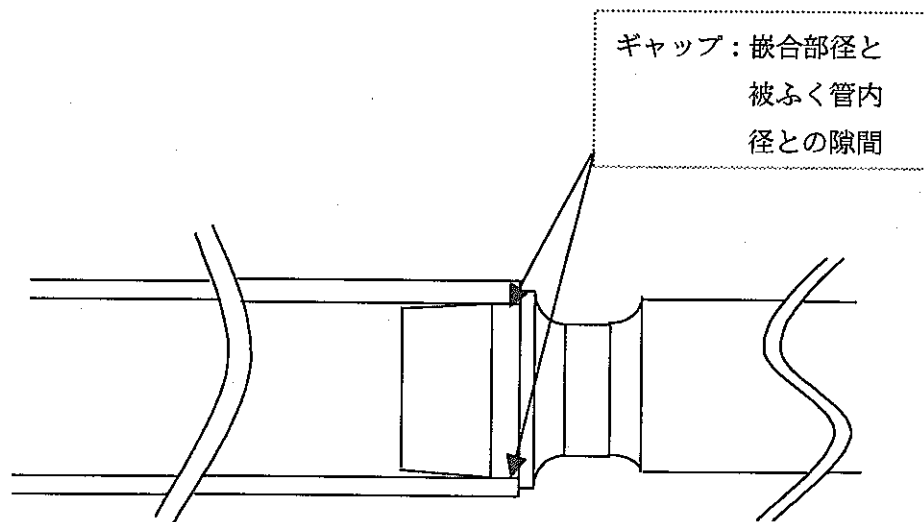


図-3 提供品のギャップ

表-4 下部端栓嵌合部と被ふく管のギャップ寸法結果 (単位: mm)

No	提供品			被ふく管			嵌合部と被ふく管のギャップ
	試料番号	外径	曲率半径	管番号	内径	外径	
1	951301	φ 5. 512	R0. 03	1009241-1	5.556~5.546	6.500~6.494	0.044~0.034
2	951302	φ 5. 511	R0. 03	2012857-1	5.564~5.558	6.504~6.496	0.053~0.047
3	951303	φ 5. 511	R0. 03	1009241-2	5.556~5.549	6.503~6.496	0.045~0.038
4	951304	φ 5. 509	R0. 03	2012857-2	5.562~5.558	6.504~6.495	0.053~0.049
5	951305	φ 5. 509	R0. 03	1009405-1	5.554~5.545	6.501~6.495	0.045~0.036
6	951306	φ 5. 510	R0. 03	2012878-1	5.566~5.559	6.506~6.500	0.056~0.049
7	951307	φ 5. 510	R0. 03	1009405-2	5.555~5.546	6.504~6.496	0.045~0.036
8	951308	φ 5. 510	R0. 03	2012878-2	5.565~5.559	6.509~6.502	0.055~0.049
9	951309	φ 5. 509	R0. 03	1009676-1	5.558~5.552	6.499~6.492	0.049~0.043
10	951310	φ 5. 508	R0. 03	2013359-1	5.563~5.556	6.504~6.498	0.055~0.048
11	955301	φ 5. 551	R0. 03	2013359-2	5.559~5.552	6.502~6.496	0.008~0.001
12	955302	φ 5. 550	R0. 03	1009676-2	5.559~5.550	6.499~6.492	0.009~0.000
13	955303	φ 5. 550	R0. 03	2013360-1	5.561~5.557	6.502~6.498	0.011~0.007
14	955304	φ 5. 552	R0. 03	1009720-1	5.558~5.551	6.503~6.497	0.006~-0.001
15	955305	φ 5. 550	R0. 03	2013360-2	5.561~5.547	6.503~6.496	0.011~-0.003
16	955306	φ 5. 551	R0. 03	1009720-2	5.555~5.548	6.500~6.496	0.004~-0.003
17	955307	φ 5. 550	R0. 03	2013369-1	5.560~5.551	6.502~6.495	0.010~0.001
18	955308	φ 5. 550	R0. 03	1009913-1	5.556~5.548	6.502~6.496	0.006~-0.002
19	955309	φ 5. 551	R0. 03	2013369-2	5.558~5.548	6.501~6.492	0.007~-0.003
20	955310	φ 5. 550	R0. 03	1009913-2	5.556~5.548	6.503~6.496	0.006~-0.002
21	951501	φ 5. 508	R0. 05	1009924-1	5.556~5.546	6.503~6.498	0.048~0.038
22	951502	φ 5. 514	R0. 05	2013371-1	5.560~5.552	6.503~6.496	0.046~0.038
23	951503	φ 5. 509	R0. 05	1009924-2	5.560~5.549	6.506~6.496	0.051~0.040
24	951504	φ 5. 510	R0. 05	2013371-2	5.558~5.551	6.502~6.496	0.048~0.041
25	951505	φ 5. 511	R0. 05	1010202-1	5.557~5.550	6.500~6.494	0.046~0.039
26	951506	φ 5. 510	R0. 05	2013374-1	5.561~5.556	6.504~6.498	0.051~0.046
27	951507	φ 5. 509	R0. 05	1010202-2	5.557~5.550	6.500~6.496	0.048~0.041
28	951508	φ 5. 510	R0. 05	2013374-2	5.558~5.552	6.504~6.498	0.048~0.042
29	951509	φ 5. 511	R0. 05	1011462-1	5.556~5.547	6.500~6.493	0.045~0.036
30	951510	φ 5. 510	R0. 05	2013375-1	5.560~5.555	6.503~6.498	0.050~0.045
31	952501	φ 5. 520	R0. 05	2013375-2	5.559~5.552	6.504~6.497	0.039~0.032
32	952502	φ 5. 521	R0. 05	1011462-2	5.558~5.548	6.503~6.495	0.037~0.027
33	952503	φ 5. 521	R0. 05	1011493-1	5.558~5.547	6.501~6.492	0.037~0.026
34	952504	φ 5. 520	R0. 05	2013379-1	5.563~5.556	6.505~6.498	0.043~0.036
35	952505	φ 5. 520	R0. 05	1011493-2	5.555~5.547	6.501~6.493	0.035~0.027
36	952506	φ 5. 521	R0. 05	2013379-2	5.560~5.555	6.504~6.497	0.039~0.034
37	952507	φ 5. 520	R0. 05	1011496-1	5.555~5.547	6.501~6.495	0.035~0.027
38	952508	φ 5. 521	R0. 05	2013380-1	5.560~5.553	6.501~6.495	0.039~0.032
39	952509	φ 5. 522	R0. 05	1011496-2	5.556~5.546	6.503~6.495	0.034~0.024
40	952510	φ 5. 521	R0. 05	2013380-2	5.558~5.549	6.500~6.493	0.037~0.028

表-4 下部端栓嵌合部と被ふく管のギャップ寸法結果 (続き) (単位: mm)

No	提供品			被ふく管			嵌合部と被ふく管のギャップ
	試料番号	外径	曲率半径	管番号	内径	外径	
41	953501	φ 5.532	R0.05	2013381-1	5.561~5.555	6.504~6.498	0.029~0.023
42	953502	φ 5.532	R0.05	1011498-1	5.557~5.548	6.501~6.494	0.025~0.016
43	953503	φ 5.532	R0.05	2013381-2	5.558~5.551	6.502~6.497	0.026~0.019
44	953504	φ 5.532	R0.05	1011498-2	5.558~5.549	6.503~6.496	0.026~0.017
45	953505	φ 5.531	R0.05	2013385-1	5.558~5.555	6.500~6.494	0.027~0.024
46	953506	φ 5.531	R0.05	1011621-1	5.562~5.553	6.505~6.498	0.031~0.022
47	953507	φ 5.532	R0.05	2013385-2	5.557~5.550	6.499~6.491	0.025~0.018
48	953508	φ 5.531	R0.05	1011621-2	5.561~5.550	6.504~6.495	0.030~0.019
49	953509	φ 5.531	R0.05	2013430-1	5.562~5.553	6.502~6.498	0.031~0.022
50	953510	φ 5.542	R0.05	1011637-1	5.560~5.550	6.503~6.494	0.018~0.008
51	954501	φ 5.542	R0.05	1011637-2	5.560~5.549	6.504~6.496	0.018~0.007
52	954502	φ 5.542	R0.05	2013430-2	5.560~5.552	6.503~6.497	0.018~0.010
53	954503	φ 5.542	R0.05	1011641-1	5.560~5.549	6.505~6.496	0.018~0.007
54	954504	φ 5.540	R0.05	2013431-1	5.561~5.554	6.504~6.496	0.021~0.014
55	954505	φ 5.540	R0.05	1011641-2	5.560~5.549	6.504~6.498	0.020~0.009
56	954506	φ 5.538	R0.05	2013431-2	5.561~5.552	6.503~6.498	0.023~0.014
57	954507	φ 5.543	R0.05	1011656-1	5.561~5.551	6.504~6.496	0.018~0.008
58	954508	φ 5.539	R0.05	2013432-1	5.563~5.553	6.503~6.497	0.024~0.014
59	954509	φ 5.541	R0.05	1011656-2	5.561~5.550	6.502~6.496	0.020~0.009
60	954510	φ 5.540	R0.05	2013432-2	5.561~5.550	6.504~6.496	0.021~0.010
61	955501	φ 5.551	R0.05	2013433-1	5.559~5.553	6.502~6.496	0.008~0.002
62	955502	φ 5.552	R0.05	1011663-1	5.560~5.550	6.502~6.495	0.008~0.002
63	955503	φ 5.551	R0.05	2013433-2	5.556~5.550	6.502~6.495	0.005~0.001
64	955504	φ 5.552	R0.05	1011663-2	5.560~5.549	6.502~6.492	0.008~0.003
65	955505	φ 5.551	R0.05	1011777-1	5.558~5.550	6.504~6.498	0.007~0.001
66	955506	φ 5.551	R0.05	2013434-1	5.561~5.554	6.502~6.497	0.010~0.003
67	955507	φ 5.550	R0.05	1011777-2	5.560~5.550	6.503~6.494	0.010~0.000
68	955508	φ 5.551	R0.05	2013434-2	5.562~5.551	6.504~6.496	0.011~0.000
69	955509	φ 5.549	R0.05	2013436-1	5.562~5.550	6.506~6.497	0.013~0.001
70	955510	φ 5.550	R0.05	1011792-1	5.561~5.553	6.502~6.497	0.011~0.003

被ふく管枝番-1, -2は、それぞれNo側, 反No側を示す。

3.2.3 提供品への番号刻印

提供された70試料について、識別管理するために、端栓刻印装置を使用して6桁の番号を刻印した。識別番号は、以下に示すように、製造者、嵌合部外径及び曲率半径により管理することとした。

955301 → 9; 日立製作所, 55; φ5.55 (嵌合部外径下2桁), 3; R0.03 (曲率半径), 01; 同一グループでの通し番号を示す。

3.2.4 溶接

提供品と被ふく管の溶接は、下部端栓溶接装置を用い、TIG自動溶接法により行った。溶接条件は、高速増殖原型炉もんじゅ第1,2回取替炉心燃料集合体と同じ条件とした。なお、溶接士の作業は、溶接作業者認定基準(MONJU-RF-QA-32)に合格した者が行った。

使用した溶接装置は、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収納(最大収納数30本)されている被ふく管を1本ずつ自動的に取り出し、刻印された下部端栓を被ふく管先端に挿入し、所定の溶接位置に搬入後、不活性ガス雰囲気中のチャンバ内で接合部を回転させながらTIG自動溶接を行うものである。表-5に溶接条件を示す。

また、図-4に被ふく管と提供品を溶接した後の形状を示す。

表-5 溶接条件

項目	溶接条件等
1. 溶接法	TIG自動溶接
2. 溶接設計	
母材の種類	SUS316相当ステンレス鋼
被ふく管	SUS316鋼相当品
下部端栓	使用しない
溶接材	アルゴン・ヘリウム混合ガス
溶接雰囲気	1層
溶接層	行わない
溶接部予熱	行わない
溶接部応力除去	
3. 溶接機	TIG自動溶接機
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	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

3.3 試験・検査方法

3.3.1 非破壊検査方法

溶接した全試料（図4）について、試験・検査要領書（MONJU-RF-QA-10）及び検査基準（MONJU-RF-QA-30A）に基づき溶接部の検査を実施した。

表-6に検査項目、判定基準等を示す。

表-6 下部端栓溶接部の検査項目

試験検査項目		判定基準	試験検査方法	試験本数
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)有害な着色のないこと。 (5)肩だれのないこと。 (6)ビード巾が著しく不均一でないこと。	目視 // // // // //	70本
	2. 端栓取付角度・外径	(1)端栓取付角度： $\leq 15' 00''$ (2)溶接部外径： $\leq \phi 6.65\text{mm}$	レーザ法 取付角度検査装置 及びリングゲージ	70本
	3. 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)	70本

(1) 溶接部外観検査

表-6に示すように下部端栓溶接部を目視にて健全性の確認を実施した。

(2) 溶接部寸法検査

端栓取付角度検査装置により、下部端栓溶接部の端栓取付角度及び溶接ビード外径を全数検査した。また、溶接ビード外径については、リングゲージでも確認した。

なお、端栓取付角度検査装置は、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なる。試料供給機構（最大収納数30本）から搬送された下部端栓付被ふく管を回転させ、最大振れ及び外径をレーザ測定器で計測し、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。

(3) X線透過試験検査

下部端栓溶接部のX線透過試験検査は、X線発生装置を使用し、フィルム2重（正フィルム・副フィルム）で直接撮影法により0°及び90°の二方向から撮影した。

撮影条件は、フィルムの識別度（フィルム両端に“ASTM E142 No7 (S)”のペネトラメータを製品と同時に撮影し識別を確認）を基に表-7に示すような条件で行った。また、フィルム判定は、正・副フィルムについて、シャウカステンを使用し、アイゲージで溶接部を拡大して観察し、フィルム第2判定員に認定された検査員が行った。

表-7 X線透過試験検査条件

撮影	焦点間距離	1 2 0 0 mm
	管電圧	1 4 0 kv
	管電流	1 0 mA
	露出時間	1 0 分 2 0 秒
	増感紙	(Pb)0.03mm 0.10mm
使用フィルム		フジ #25
現像	現像温度	2 3 °C
	定着温度	3 1 °C
	処理時間	1 1 分

3.3.2 破壊検査方法

非破壊検査結果から試験試料を選び、溶接施行試験要領書（MONJU-RF-QA-13）に基づき内圧破裂試験、引張試験及び断面金相試験を実施した。

なお、破壊試験用試料は内圧破裂試験及び引張試験用として各3試料ずつ、断面金相試験用として2試料各グループから抜き取り、精密切断機で被ふく管部を分析・試験・検査標準(MONJYU-RF-STD-363-D05)に基づき、所定の長さに切断した。

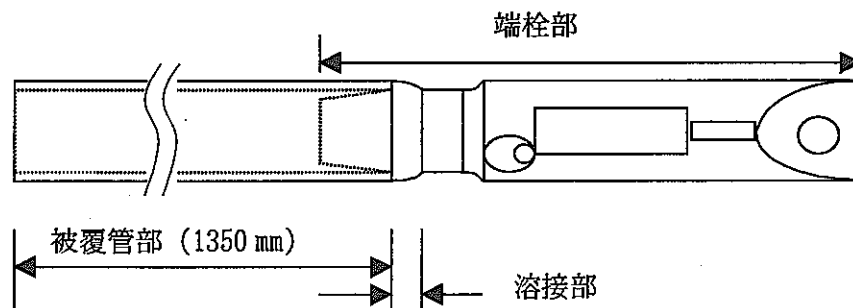


図-4 被ふく管と提供品溶接後の形状

表-8に試験項目、規格等を示す。但し、内圧破裂試験及び引張試験については、SI単位移行にともないそれぞれMPa、N換算したもので比較・評価する。

表-8 下部端栓溶接部の試験項目

試験項目		規格	試験方法	試験数量	総試料数 (7グループ)
破壊検査	1.内圧破裂試験 破裂圧力 (室温)	破裂圧力が7.4MPa(750kgf/cm ²)以上であること。	内圧加圧法	3本*	21本
	2.引張試験 引張強さ (室温)	破断荷重が4903N(500kgf)以上であること。	引張試験法	3本*	21本
	3.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	2本*	14本

*: 1グループ(10試料)中の試料数

(1) 内圧破裂試験

内圧破裂試験装置は、水圧発生部、データ処理部及びテスト部から構成されている。

加工された試験片(図-5)は、スウェージロックで水圧試験本体(圧力導入管)に固定した後、水を媒体として高圧ポンプで19.5MPaまで予蓄容器に圧縮し、その後、加圧速度17.5MPa/minで注入し破裂させた。

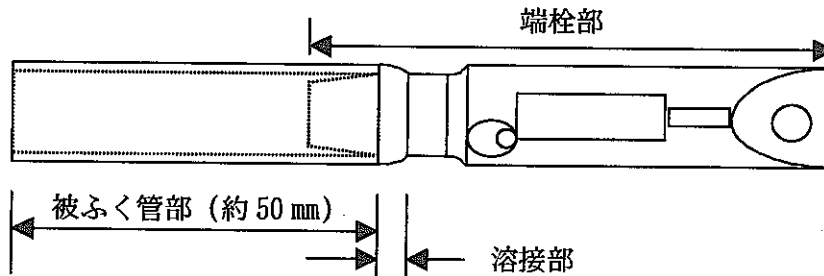


図-5 内圧破裂試験片

(2) 引張試験

被ふく管部を50mmに切断加工した試験片に、中子を入れた後、精密万能試験装置に取付けてあるくさび歯定位置式チャックで試験片を固定して引張速度2.5mm/minで引張破断させた。(図-6参照)

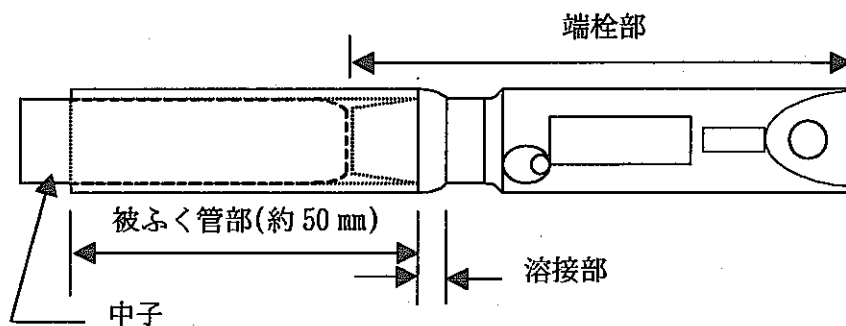


図-6 引張試験片

(3) 断面金相試験

図-7 に示す位置で切断した試料は、樹脂に埋め込み (図-8)、研磨した後、電解研磨装置を使用して、50%硝酸で電解エッチングを施し、倒立型顕微鏡を用いて50倍で写真撮影を行い溶け込み状態を確認した。

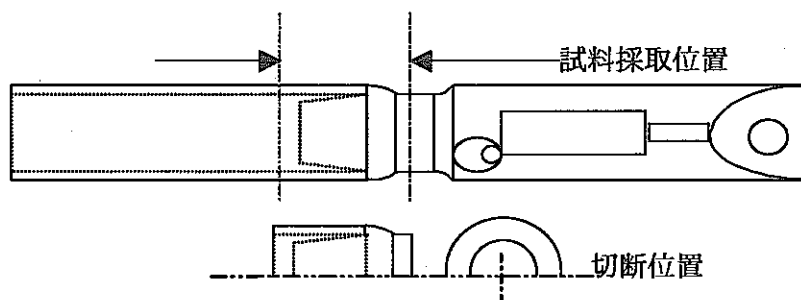
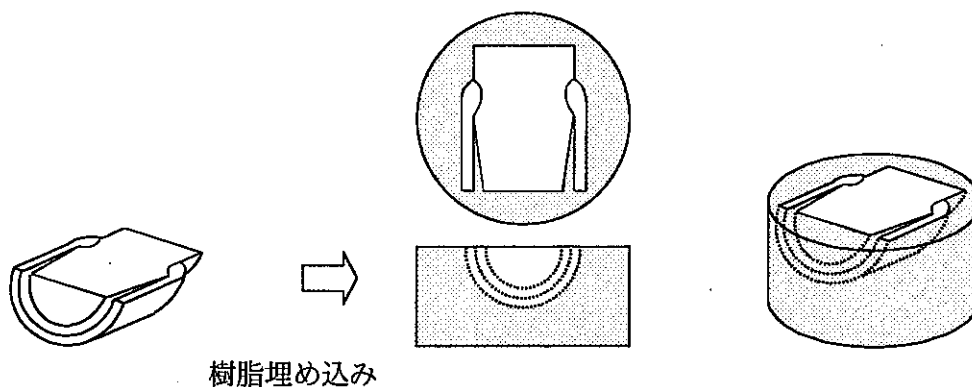


図-7 断面金相試験片の切断位置



樹脂埋め込み

図-8 断面金相試験片

3.4 試験・検査結果

全試料の非破壊、破壊検査の結果を表-9に示す。

また、以下に各試験・検査項目ごとに結果を述べる。

表-9 非破壊・破壊検査結果一覧表

No	種類	提供品	被ふく管	下部端栓付被ふく管						
		試料番号	管番号	非破壊検査結果				破壊検査結果		
				角度 ≤15°00"	外径 ≤φ6.65mm	溶接部外観 アンダーカット 及び着色等の無 いこと。	X線検査 φ1.1mmを超える ブローホール及 びインクルージ ョンの無いこと。	室温引張 4903N以上で あること。	内圧破裂 740pa以上で あること。	溶け込み 被ふく管肉 厚以上であ ること。
1	B 1	951301	1009241-1	6°56"	6.550	合格	合格	5958.1 N		
2		951302	2012857-1	9°36"	6.543	合格	合格	5982.3 N		
3		951303	1009241-2	8°39"	6.551	合格	合格		151.0 MPa	
4		951304	2012857-2	8°19"	6.549	合格	合格			
5		951305	1009405-1	8°17"	6.557	合格	合格			100 %
6		951306	2012878-1	8°57"	6.553	合格	合格		151.0 MPa	
7		951307	1009405-2	8°36"	6.563	合格	合格		149.5 MPa	
8		951308	2012878-2	6°55"	6.558	合格	合格	6352.7 N		
9		951309	1009676-1	5°55"	6.547	合格	合格			
10		951310	2013359-1	7°27"	6.568	合格	合格			111 %
11	B 2	955301	2013359-2	8°48"	6.552	合格	合格		150.0 MPa	
12		955302	1009676-2	6°31"	6.533	合格	合格		153.0 MPa	
13		955303	2013360-1	7°35"	6.560	合格	合格	6508.5 N		
14		955304	1009720-1	5°52"	6.540	合格	合格			
15		955305	2013360-2	8°10"	6.552	合格	合格			100 %
16		955306	1009720-2	7°26"	6.552	合格	合格	6580.9 N		
17		955307	2013369-1	7°52"	6.557	合格	合格	6513.7 N		
18		955308	1009913-1	9°56"	6.557	合格	合格		156.0 MPa	
19		955309	2013369-2	6°43"	6.555	合格	合格			
20		955310	1009913-2	6°58"	6.550	合格	合格			100 %
21	B 3	951501	1009924-1	9°17"	6.552	合格	合格	6548.7 N		
22		951502	2013371-1	8°46"	6.557	合格	合格	6162.5 N		
23		951503	1009924-2	8°44"	6.552	合格	合格			
24		951504	2013371-2	6°33"	6.567	合格	合格		150.0 MPa	
25		951505	1010202-1	6°58"	6.543	合格	合格			106 %
26		951506	2013374-1	7°58"	6.565	合格	合格		150.5 MPa	
27		951507	1010202-2	9°08"	6.559	合格	合格		154.5 MPa	
28		951508	2013374-2	10°30"	6.565	合格	合格			
29		951509	1011462-1	7°18"	6.560	合格	合格	6366.6 N		
30		951510	2013375-1	8°49"	6.556	合格	合格			106 %

表-9 非破壊・破壊検査結果一覧表(続き)

No	種類	提供品	被ふく管	下部端栓付被ふく管						
		試料番号	管番号	非破壊検査結果				破壊検査結果		
				角度 ≤15°00"	外径 ≤φ6.65mm	溶接部外観 アンダーカット 及び着色等の無 いこと。	X線検査 φ1.1mmを超える ブローホール及 びインクルージ ョンの無いこと。	室温引張 4903N以上で あること。	内圧破裂 74MPa以上で あること。	溶け込み 被ふく管肉 厚以上であ ること。
31	B 4	952501	2013375-2	8°29"	6.551	合格	合格		150.5 MPa	
32		952502	1011462-2	7°15"	6.552	合格	合格		152.0 MPa	
33		952503	1011493-1	8°43"	6.546	合格	合格	6392.9 N		
34		952504	2013379-1	8°24"	6.548	合格	合格			102 %
35		952505	1011493-2	7°19"	6.538	合格	合格			
36		952506	2013379-2	8°43"	6.555	合格	合格	6594.2 N		
37		952507	1011496-1	8°02"	6.545	合格	合格	6447.0 N		
38		952508	2013380-1	9°00"	6.557	合格	合格		148.5 MPa	
39		952509	1011496-2	10°07"	6.553	合格	合格			109 %
40		952510	2013380-2	10°18"	6.552	合格	合格			
41	B 5	953501	2013381-1	8°27"	6.557	合格	合格	6511.3 N		
42		953502	1011498-1	8°28"	6.549	合格	合格	6398.1 N		
43		953503	2013381-2	6°55"	6.560	合格	合格		147.0 MPa	
44		953504	1011498-2	7°53"	6.556	合格	合格			109 %
45		953505	2013385-1	7°46"	6.543	合格	合格			
46		953506	1011621-1	7°07"	6.549	合格	合格		153.0 MPa	
47		953507	2013385-2	9°09"	6.553	合格	合格		150.0 MPa	
48		953508	1011621-2	7°53"	6.552	合格	合格	6288.3 N		
49		953509	2013430-1	9°30"	6.564	合格	合格			106 %
50		953510	1011637-1	8°14"	6.548	合格	合格			
51	B 6	954501	1011637-2	6°47"	6.537	合格	合格		154.5 MPa	
52		954502	2013430-2	7°17"	6.546	合格	合格		148.5 MPa	
53		954503	1011641-1	9°34"	6.549	合格	合格			
54		954504	2013431-1	7°35"	6.558	合格	合格			106 %
55		954505	1011641-2	6°36"	6.544	合格	合格	6360.7N		
56		954506	2013431-2	7°26"	6.557	合格	合格	6433.2N		
57		954507	1011656-1	7°48"	6.555	合格	合格	6253.0N		
58		954508	2013432-1	6°44"	6.565	合格	合格		152.0 MPa	
59		954509	1011656-2	9°14"	6.554	合格	合格			106 %
60		954510	2013432-2	6°48"	6.565	合格	合格			
61	B 7	955501	2013433-1	9°02"	6.547	合格	合格	6478.7N		
62		955502	1011663-1	6°40"	6.551	合格	合格	6148.3N		
63		955503	2013433-2	7°35"	6.557	合格	合格			
64		955504	1011663-2	10°04"	6.546	合格	合格		159.0 MPa	
65		955505	1011777-1	9°19"	6.546	合格	合格			100 %
66		955506	2013434-1	8°50"	6.561	合格	合格		155.0 MPa	
67		955507	1011777-2	6°39"	6.548	合格	合格		154.5 MPa	
68		955508	2013434-2	10°36"	6.559	合格	合格	6551.2N		
69		955509	2013436-1	8°21"	6.557	合格	合格			102 %
70		955510	1011792-1	8°42"	6.555	合格	合格			

被ふく管枝番-1、-2は、それぞれNo側、反No側を示す。

3.4.1 非破壊検査結果

(1) 溶接部外観検査

目視により溶接部の外観検査を行った結果、規格を外れるものはなく、全て合格であった。(表-9参照)

(2) 溶接部寸法検査

端栓取付角度及び溶接ビード外径検査において、規格を外れるものはなく、全て合格であった。(表-9参照)

表-9の結果に基づき、端栓取付角度及び溶接ビード外径について統計的手法を用いまとめたものを表-10、-11及び図-9、-10に示す。

端栓取付角度検査については、変動係数を各グループごとに見ると9.8%(B-5)~15.6%(B-2)の範囲を示していた。ここで変動係数とは、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である。

更に、使用した被ふく管のメーカーごとに平均値と変動係数を比較すると、平均値は、S材がK材に比べ若干大きくなる傾向にあり、変動係数は、K材が6.5%(B-5)~21.3%(B-2), S材が5.3%(B-6)~16.8%(B-3)の範囲を示し、S材に比べK材の方がややバラツキが大きい。(表-10及び図-9参照)

表-10 端栓取付角度検査結果

項目 グループ	平均値			標準偏差			変動係数(%)		
	全体	K材	S材	全体	K材	S材	全体	K材	S材
B-1	7'58"	7'41"	8'15"	1'07"	1'12"	1'05"	14.0	15.6	13.1
B-2	7'35"	7'21"	7'50"	1'11"	1'34"	0'46"	15.6	21.3	9.8
B-3	8'24"	8'17"	8'31"	1'12"	1'05"	1'26"	14.3	13.1	16.8
B-4	8'38"	8'17"	8'59"	1'00"	1'11"	0'46"	11.6	14.3	8.5
B-5	8'08"	7'55"	8'21"	0'48"	0'31"	1'03"	9.8	6.5	12.6
B-6	7'35"	8'00"	7'10"	1'01"	1'22"	0'23"	13.4	17.1	5.3
B-7	8'35"	8'17"	8'53"	1'18"	1'33"	1'07"	15.1	18.7	12.6

溶接ビード外径の変動係数については、0.09%(B-4、-7)~0.14%(B-6)の範囲を示しバラツキは小さくなっている。

また、使用した被ふく管のメーカーごとの平均値と変動係数を比較すると、平均値はS材の方が、K材に比べ若干大きくなる傾向にあり、変動係数は、K材が0.05%(B-5)~0.15%(B-2), S材が0.05%(B-2)~0.14%(B-1)の範囲の値を示し両者のバラツキはほぼ同程度であった。(表-11及び図-10参照)

表-11 溶接部ビード外径検査結果

項目 グループ	平均値(mm)			標準偏差(mm)			変動係数(%)		
	全体	K材	S材	全体	K材	S材	全体	K材	S材
B-1	6.554	6.554	6.554	0.0076	0.0064	0.0095	0.12	0.10	0.14
B-2	6.551	6.546	6.555	0.0083	0.0097	0.0034	0.13	0.15	0.05
B-3	6.558	6.553	6.562	0.0073	0.0068	0.0051	0.11	0.10	0.08
B-4	6.550	6.547	6.553	0.0056	0.0061	0.0035	0.09	0.09	0.05
B-5	6.553	6.551	6.555	0.0063	0.0033	0.0080	0.10	0.05	0.12
B-6	6.553	6.548	6.558	0.0090	0.0075	0.0078	0.14	0.11	0.12
B-7	6.553	6.549	6.556	0.0058	0.0038	0.0054	0.09	0.06	0.08

表-12に示すように、溶接部ビード外径と被ふく管外径標準値(6.5mm)の差から求めたビード部盛りりは約0.03mm程度で、これはもんじゅ第1回取替キャンペーンとほぼ同じであった。

また、ビード盛りりの変動係数は、約10.9%(B-7)~17.1%(B-6)の範囲でバラツキが若干大きめの値を示している。

表-12 溶接部ビード盛りりと変動係数

項目 グループ	ビード部盛りり(mm)			変動係数(%)		
	全体	K材	S材	全体	K材	S材
B-1	0.027	0.027	0.027	14.1	11.92	17.48
B-2	0.026	0.023	0.028	16.3	20.93	6.20
B-3	0.029	0.027	0.031	12.7	12.85	8.23
B-4	0.025	0.023	0.026	11.0	12.94	6.65
B-5	0.027	0.025	0.028	11.8	6.44	14.47
B-6	0.027	0.024	0.029	17.1	15.62	13.39
B-7	0.026	0.025	0.028	10.9	7.79	9.62

(3) X線透過試験検査

判定基準(0.2mm)を超えるブローホール、インクルージョン及びクラック、空洞は確認されず全て合格であった。(表-9参照)

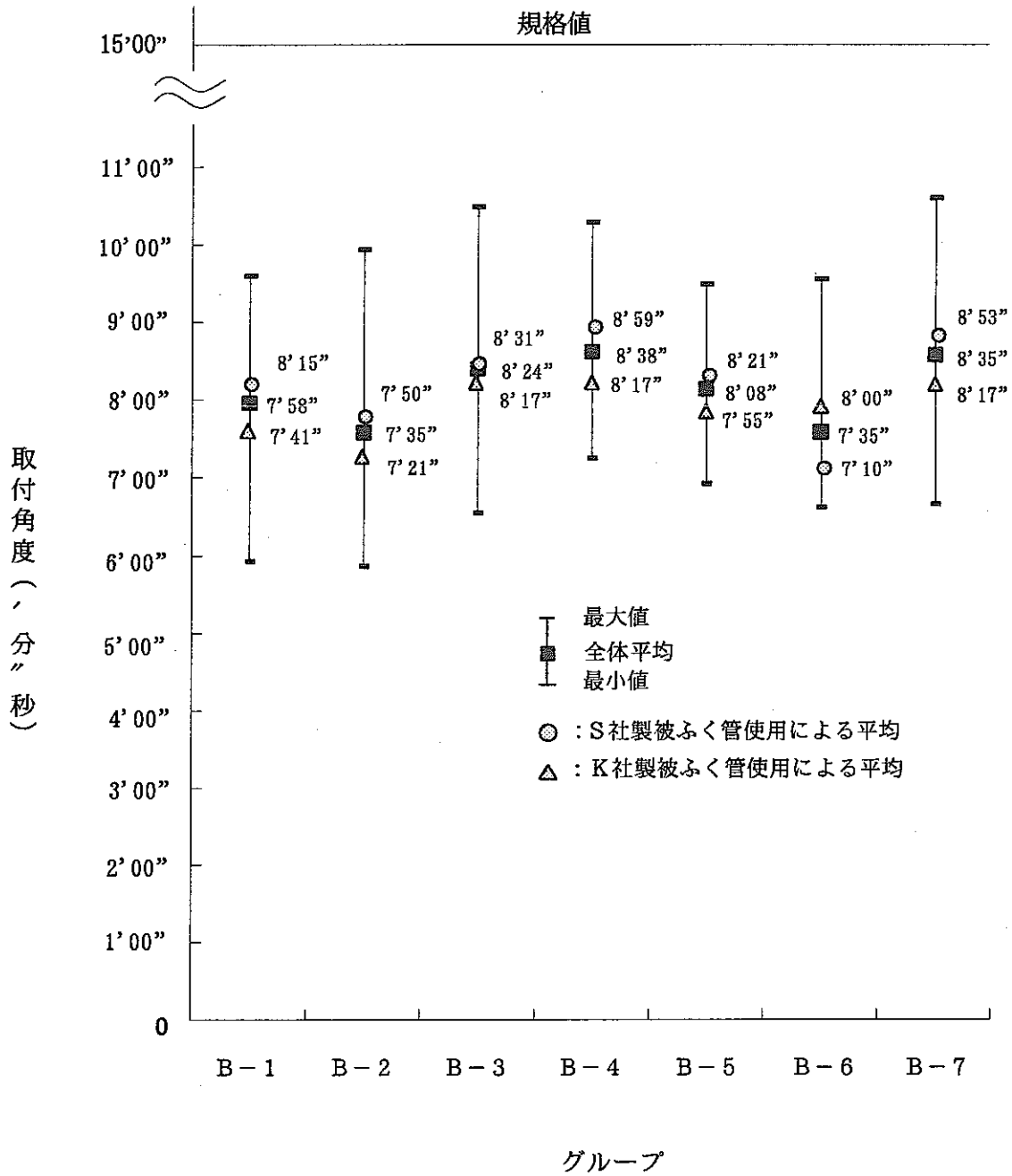


図-9 端栓取付角度検査結果

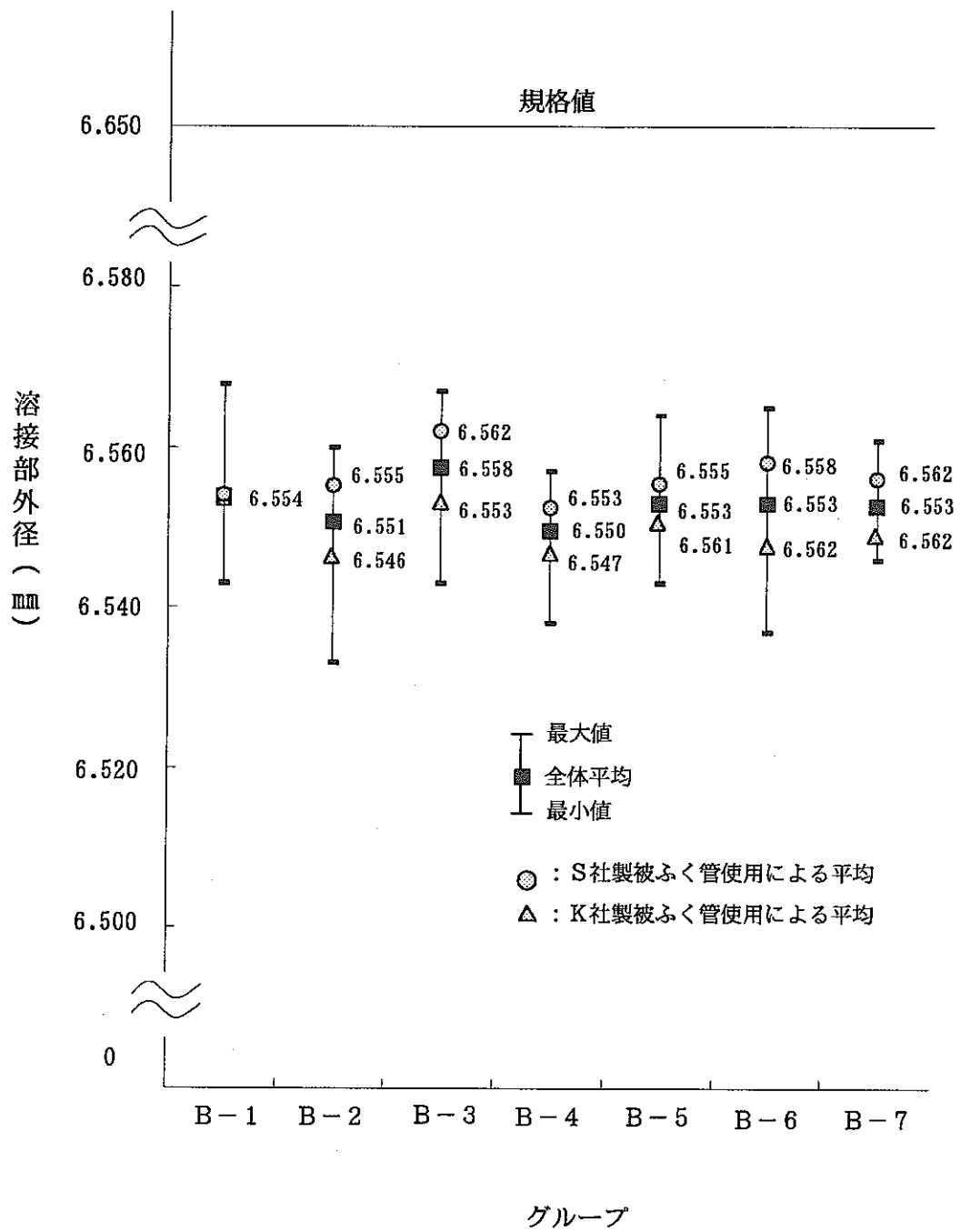


図-10 溶接部ビード外径検査結果

3.4.2 破壊検査結果

(1) 内圧破裂試験

破裂圧力は、147.0MPa～159.0MPaであり、規格74MPa(750kgf/cm²)を十分満足していた。(表-9参照)

各グループごとの平均値及び範囲(最大値-最小値)を、もんじゅ第1回取替用下部端栓溶接施行試験の結果とともに図-11に示す。また、もんじゅのデータと比較すると、B-7のデータを除いてやや低めの傾向を示しているが、その差は、全データの平均で約1.4%であり、規格値と比較して2倍以上の強度があるため、特に問題となることはない。

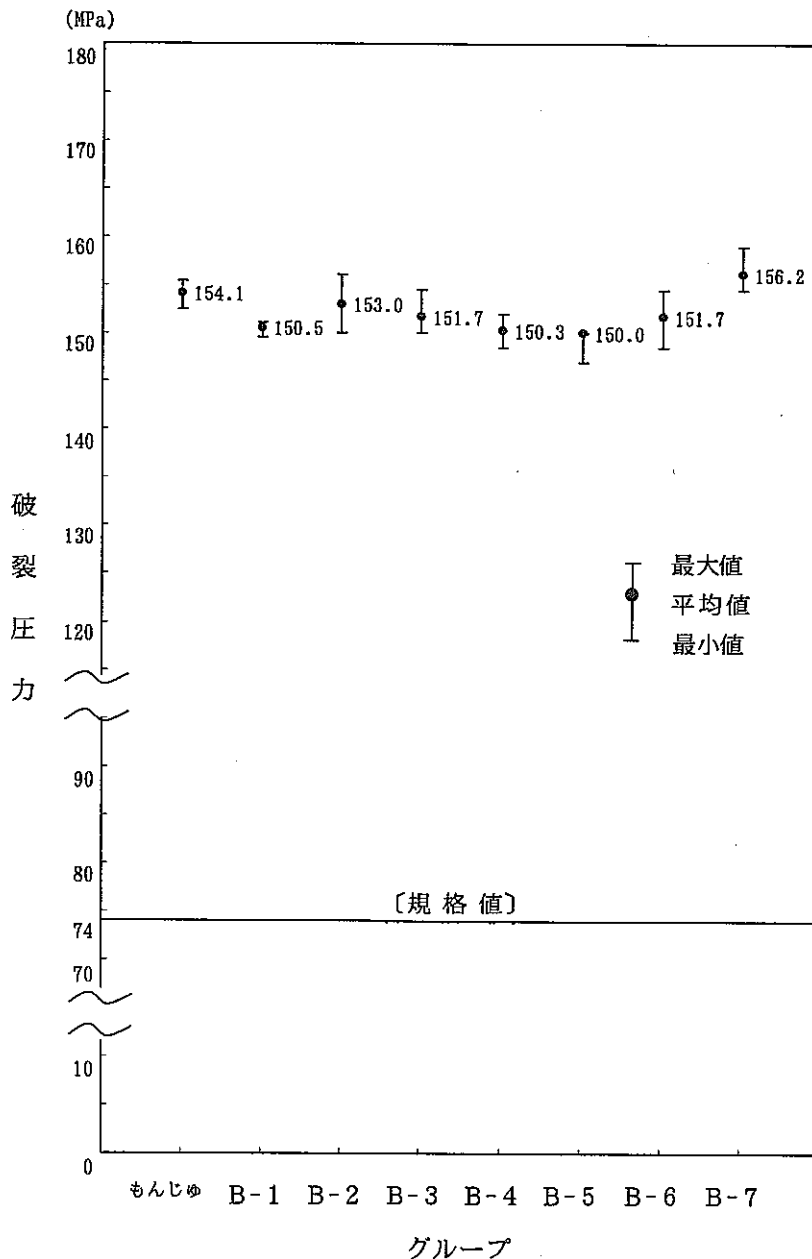


図-11 内圧破裂試験結果

(2) 引張試験

破断荷重は、5958.1N～6594.2Nであり、規格4903N(500kgf)を十分満足していた。(表-9参照)

各グループごとの平均値及び範囲(最大値-最小値)を図-12に示す。B-1の値が若干低くなっているものの、その他は特に各グループ間での有意差は認められない。

また、もんじゅのデータに比べて破裂圧力と同様、全体的に低めの傾向にあるが規格値と比べて約1.3倍と十分な強度を有しており、特に問題はない。

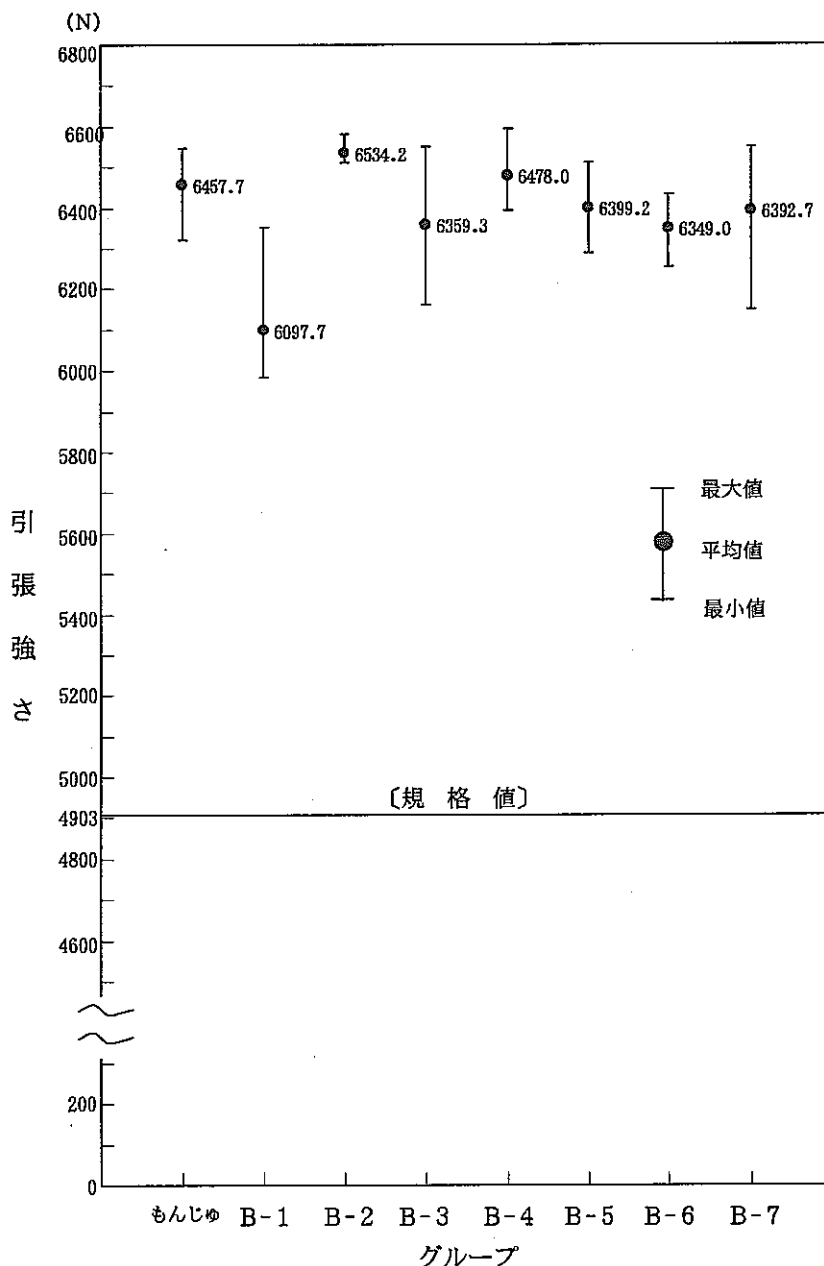


図-12 引張試験結果

(3) 断面金相試験

断面金相試験検査では、各グループごとに2試料抜取ったものについて溶接部の溶け込み状況を確認し、評価を行った。

溶け込みの量について、50倍の断面金相写真より、端栓溶接部確認用スケールを使用して、断面金相写真の首部Rと被ふく管肉厚より嵌合部を推定し、その部分の最大深さをスケールで測定した。(図-13参照)

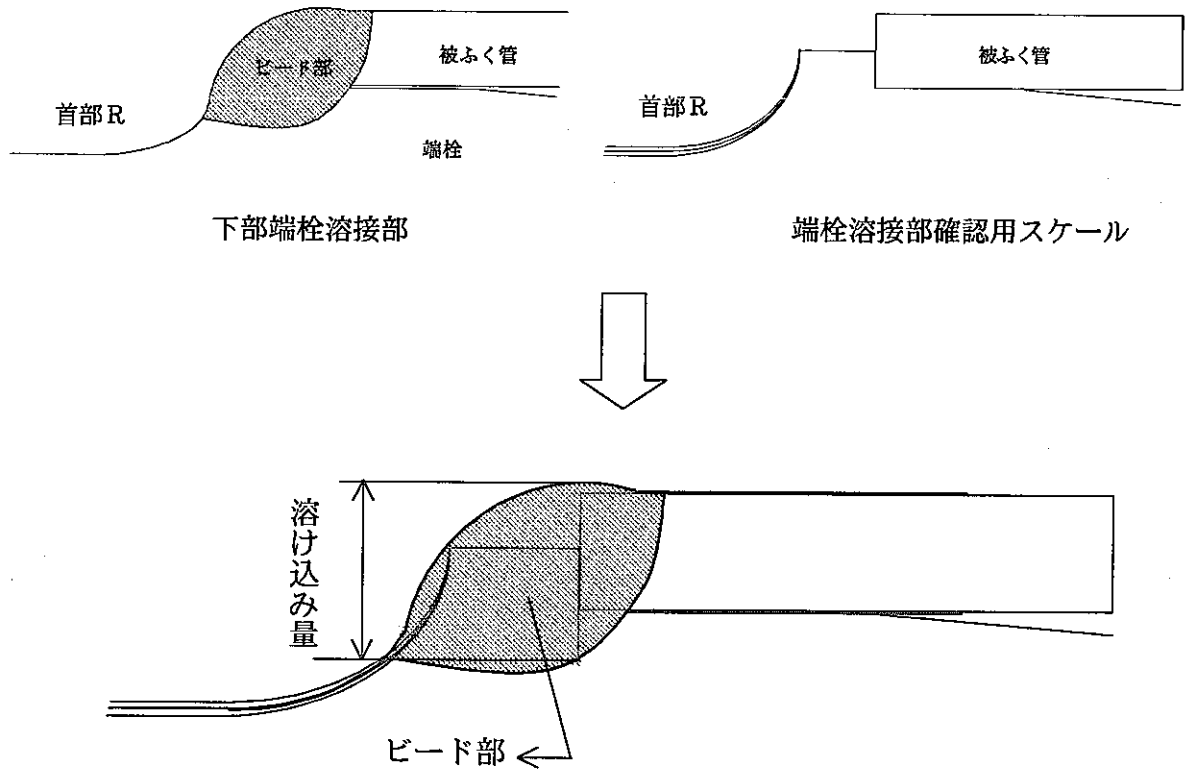
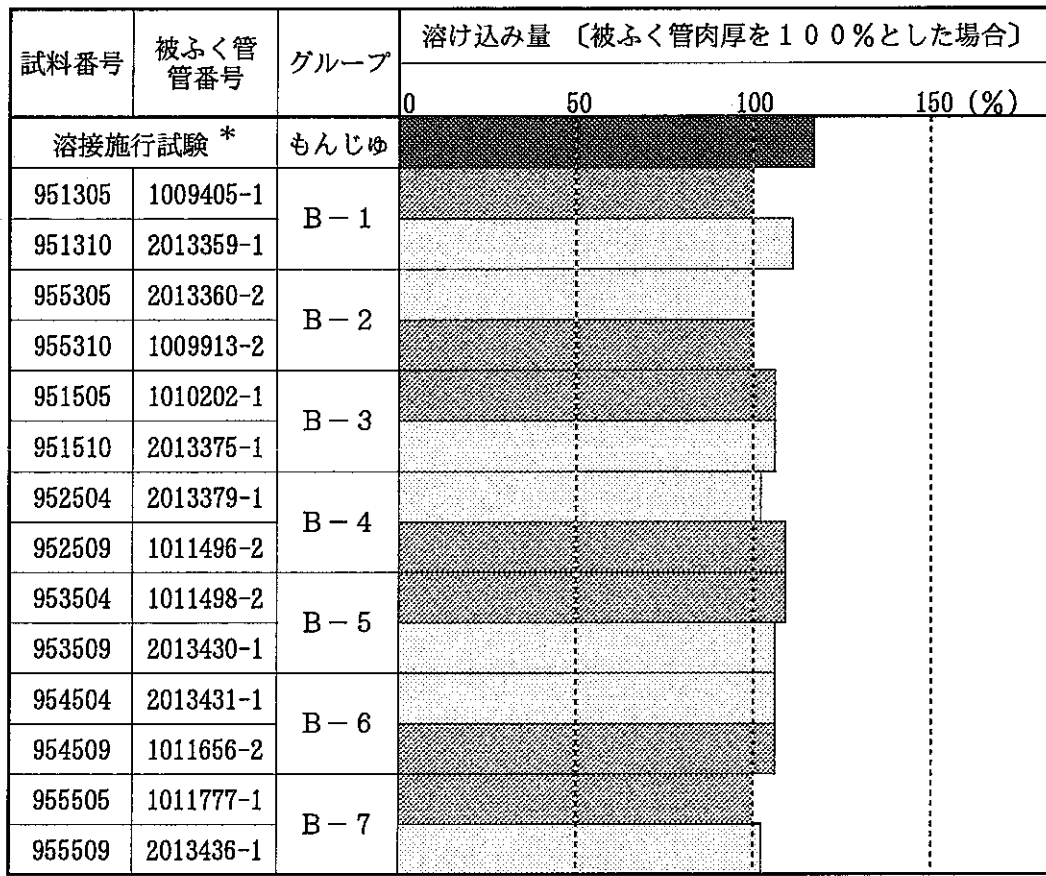


図-13 溶け込み量の測定

各試験試料の溶け込み量を図-14に示す。ここで示した溶け込み量とは、被ふく管肉厚に対する割合(百分率)で表したものであり、溶け込み量の変化を見るために便宜的に数値化したものである。

溶け込み量は、全ての試料が規格である「被ふく管肉厚相当以上を」を満足しており、平均値が約105%、最も大きいもので、111%であるのに対して、小さいものでも100%であった。

これは、過去に実施した下部端栓溶接(「もんじゅ」炉心第1回取替用)における平均値約117%と比較して小さめの値を示している。



K材被ふく管使用
 S材被ふく管使用

* ; 「もんじゅ」第1回取替用

図-14 断面金相試験結果

4. まとめ

今回、契約メーカーである日立製作所から、生産性向上を目的とした提案に基づく、端栓嵌合部の寸法を変更した下部端栓の提供品 70 試料について、本番と同一被ふく管材料（K、S社製）を使用して同一の溶接条件（もんじゅ第1回取替、もんじゅ第2回取替）で溶接を実施した後、非破壊検査（溶接部外観検査、端栓取付角度検査・ビード部外径検査、X線検査）及び破壊検査（引張試験、内圧破裂試験、断面金相試験）を行い溶接部の健全性を確認した結果、全て規格を満足していた。

当初の予想ではこれらの寸法変更が、被ふく管と端栓嵌合部の嵌め合いがうまく合致せず隙間等が発生し、溶接性が悪くなり規格を満足することが困難と考えられたが上述したように規格を満足していたことは、今回の寸法変更に対して何ら影響が無いことが確認できた。

但し、断面金相試験における溶け込み量については、規格は満足しているものの、過去における下部端栓溶接時（「もんじゅ」炉心第1回取替用）に比べ、約12%程度低下していた。このため、ある程度の溶け込み量の改善が必要とされ、溶接条件を考慮することにより対応が可能と思われる。

以上のことを踏まえると、現行の下部端栓の溶接部規格である $R \leq 0.03 \text{ mm}$ 、 $\phi 5.53 \pm 0.01 \text{ mm}$ を $R \leq 0.05 \text{ mm}$ 、 $\phi 5.53 \pm 0.02 \text{ mm}$ に変更しても溶接性には問題ないと判断されるため、今後、品質保証文書の「製造仕様・図面提案書」等に基づき関連部署へ変更提案を行ない、「もんじゅ」燃料製造に反映し、コスト低減化の一方策としたい。

なお、他に提案された上部端栓、プレナムスプリングのうち、上部端栓については溶接試験を実施していないが溶接部寸法が下部端栓と同じであるため、同様の寸法変更が可能であると思われる。

また、プレナムスプリングについては、部分的な寸法変更（総巻数を現行の 70 ± 0.5 巻から 70 ± 1 巻にしたもの）を行っても受入検査上は特に問題はなく、設計上の評価に係わる事項であるため、今後、担当課室と協議することでコスト低減化に向けて検討していきたい。