

もんじゅ模擬燃料集合体製造に係る技術報告

Manufacture of Substitutive Assemblies for MONJU Reactor Decommissioning

榊原 博 青木 伸廣 武藤 雅祐 小田部 隼
高橋 謙二 藤田 直幸 檜山 和彦 鈴木 宏和
鴨川 敏幸 横須賀 徹 斎藤 義信 萩谷 尊
安藤 康裕 山崎 竜也 木村 雅彦 菊野 浩
齋藤 浩介 生澤 佳久 亀井 美帆

Hiroshi SAKAKIBARA, Nobuhiro AOKI, Masahiro MUTO, Jun OTABE
Kenji TAKAHASHI, Naoyuki FUJITA, Kazuhiko HIYAMA, Hirokazu SUZUKI
Toshiyuki KAMOGAWA, Toru YOKOSUKA, Yoshinobu SAITO, Takeru HAGIYA
Yasuhiro ANDO, Tatsuya YAMAZAKI, Masahiko KIMURA, Hiroshi KIKUNO
Kosuke SAITO, Yoshihisa IKUSAWA and Miho KAMEI

核燃料・バックエンド研究開発部門
核燃料サイクル工学研究所
プルトニウム燃料技術開発センター
燃料技術部

Fuel Technology Department
Plutonium Fuel Development Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

March 2021

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2021

もんじゅ模擬燃料集合体製造に係る技術報告

日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 核燃料サイクル工学研究所
プルトニウム燃料技術開発センター 燃料技術部

榊原 博、青木 伸廣、武藤 雅祐、小田部 隼、高橋 謙二^{*1}、藤田 直幸^{*1}
檜山 和彦^{*2}、鈴木 宏和^{*2}、鴨川 敏幸^{*2}、横須賀 徹^{*2}、斎藤 義信^{*2}、萩谷 尊^{*2}
安藤 康裕^{*2}、山崎 竜也^{*2}、木村 雅彦^{*2}
菊野 浩、齋藤 浩介、生澤 佳久、亀井 美帆

(2020年11月25日 受理)

高速増殖原型炉もんじゅでは、現在、廃止措置が進められており、その第一段階として、炉心に装荷している燃料を取り出す工程がある。炉心の燃料集合体は、エントランスノズルが炉心支持板の連結管に挿入され自立しており、周辺の集合体によりパッド部を介して支え合い炉心体系を維持する構造となっている。そのため、燃料を取り出した場所に模擬燃料集合体を装荷し、燃料集合体を安定させる必要があった。このような背景を受け、もんじゅ炉心燃料集合体の製造経験のあるプルトニウム燃料技術開発センターへ、もんじゅ側から模擬燃料集合体の製造依頼があり、製造を行った。この報告書は、装荷する模擬燃料集合体の設計、製造、出荷について報告するものである。

核燃料サイクル工学研究所：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

*1 株式会社 E&E テクノサービス

*2 検査開発株式会社

Manufacture of Substitutive Assemblies for MONJU Reactor Decommissioning

Hiroshi SAKAKIBARA, Nobuhiro AOKI, Masahiro MUTO, Jun OTABE
Kenji TAKAHASHI*¹, Naoyuki FUJITA*¹, Kazuhiko HIYAMA*², Hirokazu SUZUKI*²
Toshiyuki KAMOGAWA*², Toru YOKOSUKA*², Yoshinobu SAITO*², Takeru HAGIYA*²
Yasuhiro ANDO*², Tatsuya YAMAZAKI*², Masahiko KIMURA*²
Hiroshi KIKUNO, Kosuke SAITO, Yoshihisa IKUSAWA and Miho KAMEI

Fuel Technology Department, Plutonium Fuel Development Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 25, 2020)

The decommissioning is currently in progress at the prototype fast breeder reactor Monju. Fuel assemblies will be taken out of its core for the first step of the great task. Fuel assemblies stand on their own spike plugged into a socket on the core support plate and support with adjacent assemblies through their housing pads each other, resulting in steady core structure. For this reason, some substitutive assemblies are necessary for the purpose of discharging the fuel assemblies of the core. Monju side commissioned, therefore, Plutonium Fuel Development Center to manufacture the substitutive assemblies and the Center accepted it. This report gives descriptions of design, manufacture, and shipment in regard to the substitutive assemblies.

Keywords: Pu Fuel Development Center, Monju, Fuel assemblies, Substitutive Assemblies, Design, Manufacture, Shipment

* 1 E&E Techno Service Co., Ltd.

* 2 Inspection Development Company Ltd.

目次

1.	概要	1
2.	年間実績	2
3.	模擬燃料集合体の設計検討	4
3.1	模擬燃料要素	4
3.1.1	構造案の検討	4
3.1.2	構造案の決定	4
3.1.3	規格品であるステンレス無垢棒を用いた模擬ピンの検討	5
3.1.4	模擬燃料要素の第一次試作	8
3.1.5	考慮事項	9
3.1.6	第一次試作を受けた検討	10
3.1.7	第二次試作による検討	12
3.1.8	脱落リスクを低減するための第三次試作による検討	15
3.1.9	規格品無垢棒を用いた模擬燃料要素案のまとめ	17
3.1.10	規格品でないステンレス無垢棒を用いた模擬燃料要素(φ7.8mm)の検討	17
3.1.11	曲がりについて	20
3.1.12	模擬燃料要素の仕様確定	20
3.2	模擬集合体組部材	21
4.	製造仕様書の作成	21
4.1	製造仕様	21
4.1.1	構成	21
4.1.2	種類	21
4.1.3	識別番号	21
4.1.4	溶接部	21
5.	製品 QA 文書の作成	22
6.	製造体数	22
7.	模擬燃料要素の製作	22
8.	模擬燃料集合体の製造フロー	23
9.	製造に伴う先行試験	24
9.1	本番部材を使用した模擬燃料集合体組立試験	24
9.1.1	バンドル組立試験	24
9.1.2	ラップ管挿入試験	25
9.1.3	ラップ管挿入試験に発生した不具合及びその他対策	30
9.2	ラップ管エントランスノズル溶接施工試験	38
10.	模擬燃料集合体の組立	43
10.1	組部材の準備	43
10.2	模擬燃料要素の準備	44

10.3	模擬燃料要素の汚染検査	45
10.4	バンドル組立	46
10.5	模擬燃料要素の組込状態確認	48
10.6	ラッパ管の挿入	50
10.7	ラッパ管・エントランスノズル溶接	53
11.	模擬燃料集合体の一時保管及び貯蔵	57
12.	模擬燃料集合体の外観検査及び寸法検査	59
13.	模擬燃料集合体の出荷に伴う梱包及びその関連作業	61
13.1	計測機器等の登録	61
13.2	収納容器の受入れ	62
13.3	梱包作業	63
13.4	模擬燃料集合体を収納した収納容器の出荷	68
14.	製造実績及び出荷実績	71
14.1	月別製造実績	71
14.2	出荷実績	72
15.	おわりに	73
	謝辞	73

Contents

1. Abstract	1
2. Annual work results	2
3. Design of substitutive assembly	4
3.1 Substitutive rod	4
3.1.1 Structural study	4
3.1.2 Decision of Structure	4
3.1.3 Study on substitutive rod made of standardized casted-steel	5
3.1.4 First trial substitutive rods	8
3.1.5 Considerations	9
3.1.6 Study after the first trial	10
3.1.7 Second trial substitutive rods	12
3.1.8 Third trial substitutive rods with anti-dislocation measure	15
3.1.9 Substitutive-rod candidates made of standardized casted steel	17
3.1.10 Substitutive rod ($\phi 7.8\text{mm}$) made of non-standardized casted steel	17
3.1.11 Bending	20
3.1.12 Determination of specifications of substitutive rods	20
3.2 Housing, spikes, and other components of assembly	21
4. Documentation of assembly specifications	21
4.1 Specifications	21
4.1.1 Components	21
4.1.2 Sorts	21
4.1.3 Identifiable indices	21
4.1.4 Welds	21
5. Quality-assurance documentation	22
6. Manufactured quantity	22
7. Substitutive-rod manufacture	22
8. Flowchart of substitutive-assembly manufacture	23
9. Preliminary-manufacture test	24
9.1 Manufacture test	24
9.1.1 Bundle-assemblage test	24
9.1.2 Housing-setting test	25
9.1.3 Measure to housing-setting trouble	30
9.2 Welding test of wrapper tube and spike	38
10. Assemblage of substitutive assembly	43
10.1 Preparation of assembly components	43

10.2	Preparation of substitutive rods	44
10.3	Radioactive contamination inspection for substitutive rods	45
10.4	Bundle assemblage	46
10.5	Checking of bundle configuration	48
10.6	Housing setting	50
10.7	Welding of wrapper tube and spike	53
11.	Storage of substitutive assemblies	57
12.	Appearance and bending inspections for substitutive assemblies	59
13.	Packaging, shipment, and related works	61
13.1	Registration of measuring instruments	61
13.2	Receiving transport container	62
13.3	Packaging	63
13.4	Shipment of transport container	68
14.	Monthly manufacture results and shipment results	71
14.1	Monthly manufacture results	71
14.2	Shipment results	72
15.	Conclusion	73
	Acknowledgement	73

図リスト

図 1	ノックバーの構造図（初装荷燃料Ⅲ型、フック部）	5
図 2	当初検討案の形状	7
図 3	第 1 次試作模擬燃料要素の構造	8
図 4	下部端栓の構造	8
図 5	ノックバー/模擬燃料要素嵌合部の状況	9
図 6	下部端栓形状が脱落を防止する原理	11
図 7	模擬燃料要素軸中心を炉心燃料と合わせた場合の下端部矢視図	12
図 8	第二次試作模擬燃料要素（A-1 タイプ）	13
図 9	第二次試作模擬燃料要素（A-2 タイプ）	13
図 10	第二次試作模擬燃料要素（B タイプ）	14
図 11	第二次試作模擬燃料要素（C タイプ）	14
図 12	第三次試作模擬燃料要素構造	15
図 13	ノックバーの配置	16
図 14	模擬燃料要素最終案構造図	18
図 15	模擬燃料要素確定図	20
図 16	模擬燃料集合体の製造フロー図	23
図 17	バンドル組立 1	24
図 18	バンドル組立 2	25
図 19	模擬燃料要素とラップ管接触イメージ図 1	25
図 20	模擬燃料要素とラップ管接触イメージ図 2	26
図 21	ラップ管内径イメージ図	27
図 22	模擬燃料要素イメージ図（隙間有）	27
図 23	ラップ管挿入試験 1	28
図 24	ラップ管挿入試験 2	28
図 25	ラップ管挿入試験 3	29
図 26	ラップ管挿入試験 4	29
図 27	バンドル押さえ治具	30
図 28	バンドル押さえ治具取付図	30
図 29	バンドル押さえ治具取付図模擬燃料要素収束イメージ図（広がりの防止）	31
図 30	ラップ管挿入イメージ図	31
図 31	バンドル押さえ治具取付 1	32
図 32	バンドル押さえ治具取付 2	32
図 33	バンドル押さえ治具取付後ノギスによる寸法検査	33
図 34	手動操作でのラップ管挿入の様子 1	36
図 35	手動操作でのラップ管挿入の様子 2	37
図 36	溶接条件（第 2 回購入）	39

図 37	溶接ビード部溶け込み（第 2 回購入）	40
図 38	溶接ビード部外観（第 2 回購入）	40
図 39	溶接条件（第 3 回購入）	41
図 40	溶接ビード部溶け込み（第 3 回購入）	42
図 41	溶接ビード部外観（第 3 回購入）	42
図 42	模擬燃料要素収納木箱	44
図 43	汚染検査の様子	45
図 44	バンドル組立の様子 1	46
図 45	バンドル組立の様子 2	47
図 46	バンドル組立の様子 3	47
図 47	模擬燃料要素組込確認の様子 1	48
図 48	模擬燃料要素組込確認の様子 2	49
図 49	模擬燃料要素組込確認の様子 3	49
図 50	模擬燃料要素組込確認の様子 4	50
図 51	ラップ管挿入の様子 1	51
図 52	ラップ管挿入の様子 2	51
図 53	ラップ管挿入の様子 3	52
図 54	ラップ管挿入の様子 4	52
図 55	ラップ管挿入の様子 5	53
図 56	ラップ管・エントランスノズル溶接の様子 1	54
図 57	ラップ管・エントランスノズル溶接の様子 2	54
図 58	ラップ管・エントランスノズル溶接の様子 3	55
図 59	ラップ管・エントランスノズル溶接の様子 4	55
図 60	ラップ管・エントランスノズル溶接の様子 5	56
図 61	ラップ管・エントランスノズル溶接の様子 6	56
図 62	模擬燃料集合体の一時保管及び貯蔵の様子 1	57
図 63	模擬燃料集合体の一時保管及び貯蔵の様子 2	58
図 64	模擬燃料集合体外観検査、寸法検査の様子	60
図 65	分銅を使用した校正の様子	61
図 66	収納容器内の確認の様子（蝶ネジの錆確認）	62
図 67	梱包の様子 1	63
図 68	梱包の様子 2	64
図 69	梱包の様子 3	64
図 70	梱包の様子 4	65
図 71	梱包の様子 5	65
図 72	梱包の様子 6	66
図 73	梱包の様子 7	66
図 74	梱包の様子 8	67

図 75	出荷の様子 1	68
図 76	出荷の様子 2	69
図 77	出荷の様子 3	69
図 78	出荷の様子 4	70
図 79	月別組立実績	71
図 80	出荷実績	72

表リスト

表 1	H29 年度実績	2
表 2	H30 年度実績	3
表 3	H31 年度実績	3
表 4	R2 年度実績	3
表 5	無垢棒での当初検討案	6
表 6	第二次試験のパラメータ表	12
表 7	第三次試験のパラメータ表	16
表 8	重量計算表	19
表 9	ラップ管挿入速度調整（ラップ管前後用モータ）	34
表 10	ラップ管・エントランスノズル溶接施行試験結果表	38
表 11	模擬燃料集合体外観検査、寸法検査合格基準	59

Figure list

Figure 1	Knock-bar structure (hook) of MONJU core fuel	5
Figure 2	Structural brainstorming at the beginning	7
Figure 3	1 st trial substitutive rod structure	8
Figure 4	Lower end plug structure of MONJU core fuel	8
Figure 5	Knock bar/substitutive rod linkage	9
Figure 6	Principle of anti-dislocation	11
Figure 7	Arrow view of substitutive rod	12
Figure 8	2 nd trial rod (A-1)	13
Figure 9	2 nd trial rod (A-2)	13
Figure 10	2 nd trial rod (B)	14
Figure 11	2 nd trial rod (C)	14
Figure 12	3 rd trial rod	15
Figure 13	Configuration of knock bars	16
Figure 14	Final trial rod	18
Figure 15	Substitutive rod structure	20
Figure 16	Flowchart of substitutive assembly manufacture	23
Figure 17	Bundle-assemblage test 1	24
Figure 18	Bundle-assemblage test 2	25
Figure 19	Schematic illustration of contact between substitutive rods and wrapper tube 1	25
Figure 20	Schematic illustration of contact between substitutive rods and wrapper tube 2	26
Figure 21	Definition of “inner dimension” of wrapper tube	27
Figure 22	Substitutive-rod bundle (with significant clearance)	27
Figure 23	Housing-setting test 1	28
Figure 24	Housing-setting test 2	28
Figure 25	Housing-setting test 3	29
Figure 26	Housing-setting test 4	29
Figure 27	Bundle-fixing jig	30
Figure 28	Schematic illustration of bundle-fixing-jig disposition	30
Figure 29	Temporary-fixed bundle by bundle-fixing jig	31
Figure 30	Schematic illustration of housing setting	31
Figure 31	Bundle-fixing-jig installation 1	32
Figure 32	Bundle-fixing-jig installation 2	32
Figure 33	Dimension measurement by vernier caliper after bundle fixing	33
Figure 34	Manually-operated housing setting 1	36

Figure 35	Manually-operated housing setting 2	37
Figure 36	Weld conditions for 2 nd -purchased component materials	39
Figure 37	Weld penetration for 2 nd -purchased component materials	40
Figure 38	Weld bead for 2 nd -purchased component materials	40
Figure 39	Weld conditions for 3 rd -purchased component materials	41
Figure 40	Weld bead for 3 rd -purchased component materials	42
Figure 41	Weld bead for 3 rd -purchased component materials	42
Figure 42	Transport box for substitutive rods	44
Figure 43	Contamination survey	45
Figure 44	Bundle assemblage 1	46
Figure 45	Bundle assemblage 2	47
Figure 46	Bundle assemblage 3	47
Figure 47	Checking of bundle configuration 1	48
Figure 48	Checking of bundle configuration 2	49
Figure 49	Checking of bundle configuration 3	49
Figure 50	Checking of bundle configuration 4	50
Figure 51	Setting housing 1	51
Figure 52	Setting housing 2	51
Figure 53	Setting housing 3	52
Figure 54	Setting housing 4	52
Figure 55	Setting housing 5	53
Figure 56	Welding of wrapper tube and spike 1	54
Figure 57	Welding of wrapper tube and spike 2	54
Figure 58	Welding of wrapper tube and spike 3	55
Figure 59	Welding of wrapper tube and spike 4	55
Figure 60	Welding of wrapper tube and spike 5	56
Figure 61	Welding of wrapper tube and spike 6	56
Figure 62	Substitutive assembly transport to temporary storage 1	57
Figure 63	Substitutive assembly transport to temporary storage 2	58
Figure 64	Appearance inspection and dimension inspection	60
Figure 65	Load cell calibration with weight	61
Figure 66	Checking of transport container (rust on bolt and wing nut)	62
Figure 67	Packaging process 1	63
Figure 68	Packaging process 2	64
Figure 69	Packaging process 3	64
Figure 70	Packaging process 4	65
Figure 71	Packaging process 5	65
Figure 72	Packaging process 6	66

Figure 73	Packaging process 7	66
Figure 74	Packaging process 8	67
Figure 75	Shipment 1	68
Figure 76	Shipment 2	69
Figure 77	Shipment 3	69
Figure 78	Shipment 4	70
Figure 79	Assemblage monthly results	71
Figure 80	Shipment results	72

Table list

Table 1	2017 fiscal year work results	2
Table 2	2018 fiscal year work results	3
Table 3	2019 fiscal year work results	3
Table 4	2020 fiscal year work results	3
Table 5	Structural brainstorming at the beginning with casted-steel rods	6
Table 6	Test parameters for the 2 nd trial rods	12
Table 7	Test parameters for the 3 rd trial rods	16
Table 8	Mass-calculation table of substitutive-rod bundle	19
Table 9	Housing-setting rate adjustment	34
Table 10	Welding test results of wrapper tube and spike	38
Table 11	Criteria for appearance and dimension inspections	59

1. 概要

本件は、高速増殖原型炉もんじゅ（以下もんじゅ）廃止措置で行われる炉心燃料体の取り出し作業で使用する模擬燃料集合体の製造である。

炉内での燃料体はエントランスノズルが炉心支持板の連結管に挿入された自立構造となっており、模擬体を用いなくても取出しは行えるが、地震発生時の燃料体の過度の変形、曲り等を防止するため、燃料取り出し後のスペースに模擬燃料集合体を装荷して、地震時の炉心構成要素群の振動を抑制するために必要となる。この模擬燃料集合体の外観形状は炉心燃料体と同じであるが、内部は減圧機構や重量模擬体で構成されるなど炉心燃料集合体とは構造が異なることから、プルトニウム燃料技術開発センター（以下プルセンター）で製造する場合はもんじゅ炉心燃料製造用の残部材を活用するとともにプルトニウム燃料第三開発室の既存設備で製造を行う方策として一から設計が必要となった。更に、製造に係る工程設備対応での課題の抽出と対策が必要であった。

このため、模擬燃料集合体の設計から製造、検査、出荷に係る一連の作業を品質管理体制に則った形で進めるとともに試作試験を通して課題への対策を行った。まず、模擬燃料集合体は炉心燃料集合体の重量を模擬することに加え、模擬体内のナトリウム流路を確保する必要がある、プルセンター燃料技術部設計解析課が中心となって設計を開始するため、設計計画書（模擬燃料集合体）を制定した。数ヶ月後、プルセンター燃料技術部設計解析課の尽力により、模擬燃料集合体の内部構造を残部材の構造をそのまま活かし、エントランスノズル組立品のフック部に先端を引っ掛ける方式の模擬燃料要素で構成した設計とし、試作試験を繰り返すことでもんじゅ側の要望するナトリウムの流路確保や重量模擬を満足させるとともにプルトニウム燃料第三開発室の既存工程設備で組立可能な設計を完了することができた。

実際の製造における組立手順については、炉心燃料集合体と異なりエントランスノズルフック部に模擬燃料要素を手作業で組み込んでいく必要があったことから、通常は立入ることのない集合体組立設備内での作業位置や必要な人数、それぞれの役割等が明確になっておらず、試運転を繰り返しながら最適な作業方法を見つけ出し、それらを作業マニュアルに反映させていった。

これら、模擬燃料集合体の製造に係る作業は品質管理体制を整備して実施され、2018年2月に1体目の組立に漕ぎ付け、2019年8月に当初計画の120体を無事完了した。

なお、もんじゅへの模擬燃料集合体の出荷は、もんじゅ側の要望に合わせ2018年5月に8体、同年8月に23体と16体、2019年8月に44体、2020年4月に29体とそれぞれ滞りなく実施され、もんじゅ廃止措置計画に協力できた（2.年間実績表1～表4参照）。

2. 年間実績

表 1 H29 年度実績

項目	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
もんじゅから模擬集合体の製造の相談	▼											
もんじゅより正式依頼（業連）				▼								
内部構造の設計・試作 試験（模擬燃料要素）	←→											
製造仕様書作成		←要素→		←→	▼制定							
工程管理要領書作成	←→			←集合体→	▼制定							
部材（模擬燃料要素） 調達					▼発注			←製作→				
先行試験						←溶接施行試験→				←組立試験→		
模擬集合体組立												←→
炉側検査												▼

表2 H30 年度実績

項目	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
部材調達 (模擬燃料要素)	▼ 3400本	▼ 3400本	▼ 3400本	▼ 3400本	▼ 3400本	▼ 1300本						
模擬集合体組立・ 検査	▼ 組立8 検査9	▼ 組立12 検査13	▼ 組立5 検査5	▼ 組立14 検査12	▼ 組立9 検査7	▼ 組立10 検査11	▼ 組立18 検査18	▼ 組立14 検査14	▼ 組立4 検査4	▼ 組立6 検査6		
炉側検査	▼	▼		▼	▼		▼	▼				
梱包		▼ 8体	▼ 16体	▼ 11体	▼ 12体			▼ 8体	▼ 8体		▼ 20体	▼ 8体
出荷		▼ 8体			▼ 23体	▼ 16体						

表3 H31 年度実績

項目	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
模擬集合体組立・ 検査				▼ 組立11 検査9	▼ 組立1 検査3					▼ 組立6 検査6		
炉側検査	▼			▼								
梱包												▼ 29体
出荷					▼ 44体							

表4 R2 年度実績

項目	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
炉側検査	▼											
出荷	▼ 29体											

3. 模擬燃料集合体の設計検討

もんじゅ側から模擬燃料集合体の条件として、重量（模擬集合体1体あたり $180 \pm 18\text{kg}$ ）を模擬すること、とされていた。これを前提条件として検討を行った。

3.1 模擬燃料要素

3.1.1 構造案の検討

(1) 既存模擬体類似構造案

始めに、もんじゅサイトに既存する模擬集合体類似構造（ピン形状ではない六角形状の重量物が入っている）が考えられた。一方、プルセンターにおいて模擬燃料集合体を製造する場合には、当センターに既存の組部材を利用することが前提となっており、この組部材はノックバーとエントランスノズルが既に溶接されたものである。従って、既存の模擬集合体類似構造では、ノックバー部分の切断や、詳細な構造（重量模擬体の形状・寸法及び固定方法）が不明ということもあり、候補から外れることとなった。

(2) 模擬ペレットによる燃料集合体類似構造案

そこで、被覆管、端栓等の燃料要素部材の在庫を利用し、金属製の模擬ペレットを充填する案が示された。この案は、ペレットの質量密度変化を許容することになるため、スリーブ等の長さを変更する可能性もあるが、プレナム空間確保の要件が無いため、これは特に問題視されなかった。一方で、既存もんじゅ用被覆管は将来的に常陽の炉心燃料に利活用する案が検討されていたこと、また、模擬ペレットの充填、ヘリウムの封入及び上部端栓の溶接にはホット設備（既存のグローブボックス包蔵設備）を使用することとなるため、無用な汚染発生の懸念とワイヤ巻付けに伴う工期の遅延等の理由により、本案も候補から外れることとなった。

(3) 無垢棒製の模擬ピンを用いる案

外筒部には既存部材を用いることとしていたため、本質的な要求が重量だけであったことから、ナトリウムの流路を確保するワイヤの巻き付けを必要としないステンレス製の無垢棒で模擬燃料要素を模擬する案が考えられた。この案は模擬燃料要素の製作のみで、模擬燃料集合体が完成できる、最も効率的な案と考えられた。

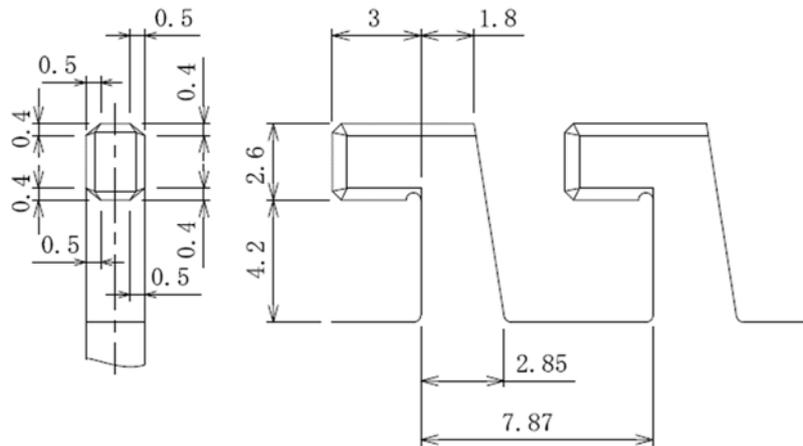
3.1.2 構造案の決定

3.1.1 (1) ～ (3) までに提案された構造案のうち、前述 3.1.1(3)の無垢棒により模擬燃料要素を代替する案は、前述 3.1.1(1)及び3.1.1(2)の様々な懸念及び課題を一掃できるメリットがあった。これらを踏まえ、無垢棒による重量を模擬した模擬燃料要素を製作し、これらを組み込むことにより模擬燃料集合体を製作することに決定した。

3.1.3 規格品であるステンレス無垢棒を用いた模擬ピンの検討

無垢棒を用いた模擬燃料要素採用の前提条件として、納期までに調達可能であることが挙げられた。そのため規格品（直径 7.5 mm や直径 8.0 mm などその径が 0.5 mm 毎に予め製造された棒材）使用の可否とノックバーのフック部間隔（組立時の模擬燃料要素の間隔）が 7.87 mm（図 1）であることを考慮し幾つかの案を選定した。選定した案を表 5 に示す。

このうち、「直径 7.5 mm の模擬燃料要素バンドル中に直径 8 mm の模擬燃料要素を混在させる」案は、「直径 7.5 mm の模擬燃料要素のみを用いたバンドル」の場合に発生する大きな隙間に配慮し、これをできるだけ減らすよう工夫したものである。しかし、後述する 3.1.5 (3) の理由から、大きなメリットがある、とは言い難いものであった。また、「直径 8 mm の混在」案と「2 倍径の模擬燃料要素 37 本使用」案はいずれも納期に有利と考えられたが、調達を含めた詳しい検討俎上に至ることはなく、基本的に直径 7.5 mm の模擬燃料要素でバンドルを構成する案のみで検討を行うこととなった。

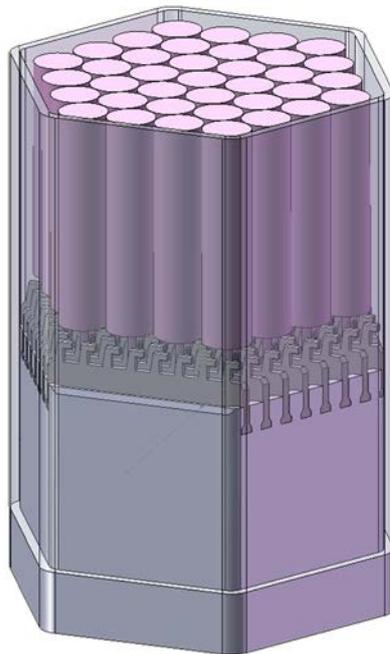
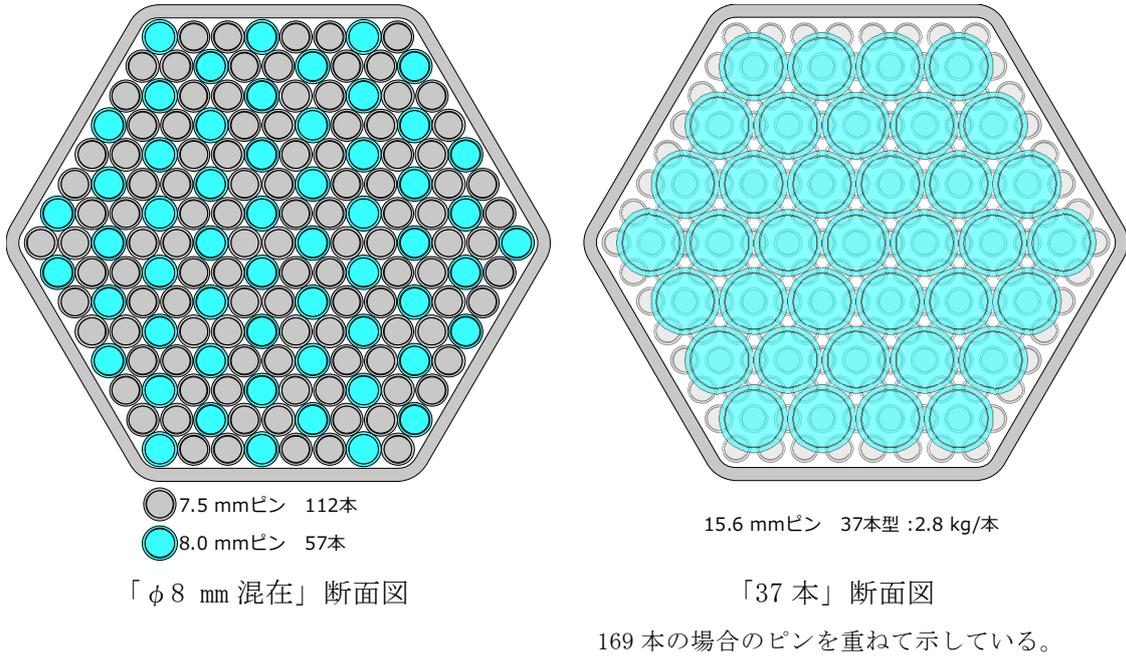


(単位 : mm)

図1 ノックバーの構造図（初装荷燃料Ⅲ型、フック部）

表 5 無垢棒での当初検討案

案	概要	メリット	デメリット
φ 7.5 mm	φ 7.5 mm だけで 169 本バンドルを構成する。	<ul style="list-style-type: none"> ◆既製寸法であり調達のリスクが少ない。 ◆同一形状のみで構成され管理が容易。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆本来は 7.82 (被覆管直径 6.5 mm+ワイヤ直径 1.32) mm で構成されるものに対し、直径が細くなるのでバンドルとラップ管との間隙が大きくなる。 ◆下部端栓と類似な下端部構造とした場合には、脱落する可能性が高い。 ◆水平方向の動きに対して重心の移動が起こりやすい。
φ 8 mm 混在 (図 2 参照)	φ 7.5 mm を約 2/3 (112 本)、φ 8 mm を約 1/3 (57 本) 用いる。	<ul style="list-style-type: none"> ◆間隙を若干減らす効果がある。 ◆2:1 の比での分割発注によって、納期に有利。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆別仕様ピンが混在するので組立て時の管理が面倒になる。
φ 15.6 mm を 37 本 (図 2 参照)	約 2 倍の径のピンを用いて 37 本バンドルにする。	<ul style="list-style-type: none"> ◆必要本数が劇的に少ない (130 体あたり : 21,970 ⇒ 4,810 本) ため、納期で有利となる可能性。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆目標にする径が規格品ではない。(15 mm 又は 16 mm が規格品) ◆約 2.8 kg/本となり、組立時の作業性に支障が出ると予想される。 ◆ノックバーのフック部が炉内環境 (250 °C) では取り扱い時の加速度制限 (6G) を満たすことができない。(4G 強が限度)
φ 7.82 mm (規格品でないため参考扱い)	φ 7.82 mm だけで 169 本バンドルを構成する。	<ul style="list-style-type: none"> ◆幾何学的に燃料集合体に近く、隙間が少ない。このため、問題が少ないと考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆規格品ではないため、一本毎に加工が必要となるため、納期に間に合わない可能性が高い。



「37本」鳥瞰図

図2 当初検討案の形状

3.1.4 模擬燃料要素の第一次試作

図3に示すような短尺模擬燃料要素（直径7.5 mm、長さ20 cm）を試作した。比較のためにもんじゅ炉心燃料の下部端栓構造を図4に示す。実機の炉心燃料の下部端栓では、フック部へ引掛ける挿入穴径は $\phi 3$ mm であるが、試作模擬燃料要素では、作業性を考慮し、穴径をやや拡大して $\phi 3.1$ mm とした。また、端部（差し込み部分）の厚さを2 mm とし、フック部の間隙へ垂直に挿入可能な形状とした。

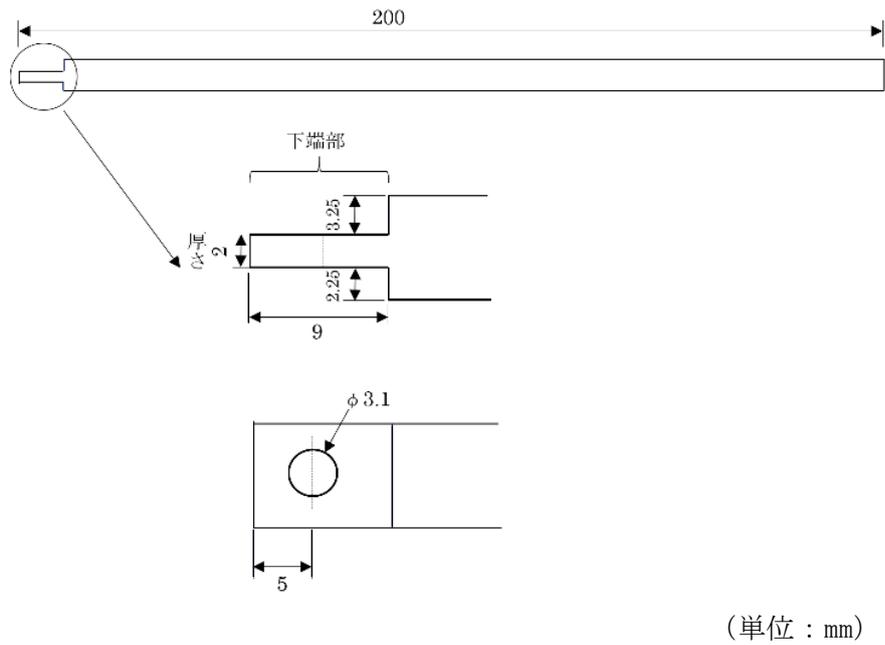


図3 第1次試作模擬燃料要素の構造

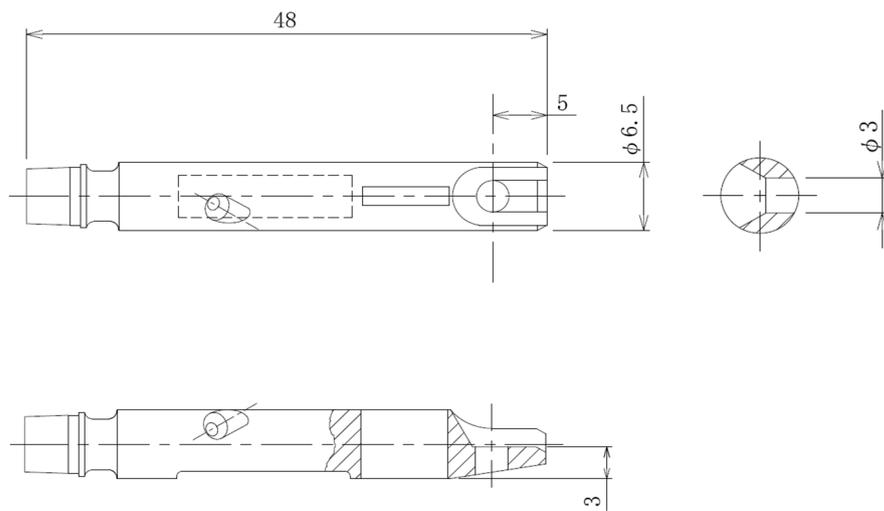


図4 下部端栓の構造

3.1.5 考慮事項

この第一次試作ピンを嚙矢として、模擬燃料要素形状寸法の詳細な検討を行った。この際、以下の事項を考慮した。

(1) 重量

もんじゅ側要求である集合体重量 180 kg に対し、模擬燃料要素以外の部材重量が 77.0 kg あること、十分な誤差 (± 18 kg) が取られていることから「模擬ピン束のみの重量として 103 kg 程度」と解釈することとした。なお、模擬燃料要素の全長を調節することによって、この数値に重量を合致させられるため、重量誤差の考慮をほぼ皆無とすることが可能となる。但し、実機の炉心燃料とは模擬燃料要素体積が異なるため、ナトリウム中での浮力が異なる、従って空気中重量（質量）を炉心燃料と合致させても、ナトリウム浸漬時に燃料取扱装置が受ける荷重には数 kgf の差が生まれることに言及しておく。

(2) バンドル組み立て時の作業性及び脱落防止機能

もんじゅの炉心燃料要素は、被覆管直径とワイヤ径の和が 7.82 mm となる。今回、直径 7.5 mm の模擬燃料要素を採用することによって、炉心燃料要素と比較し相互の間隙が大きくなることから、従来下部端栓形状では模擬燃料要素がフックの開放部側に偏った場合に脱落する可能性があった（図 5 参照）。従って、組み立てに係る作業性を阻害せず、且つ脱落のリスクを抑制した形状を検討する必要がある。

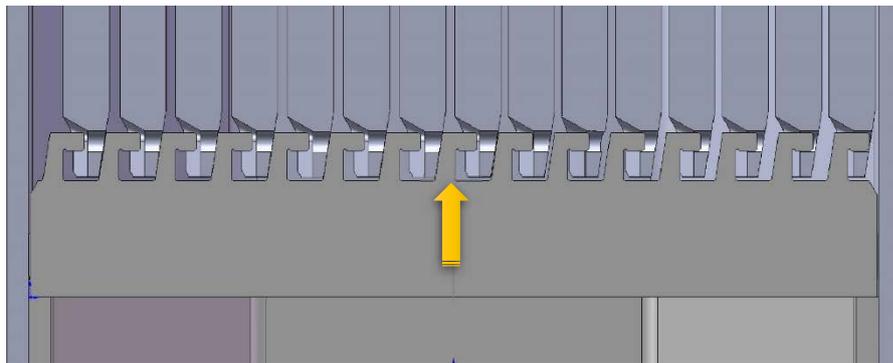


図 5 ノックバー/模擬燃料要素嵌合部の状況

(3) 地震時の質量分布変化による影響

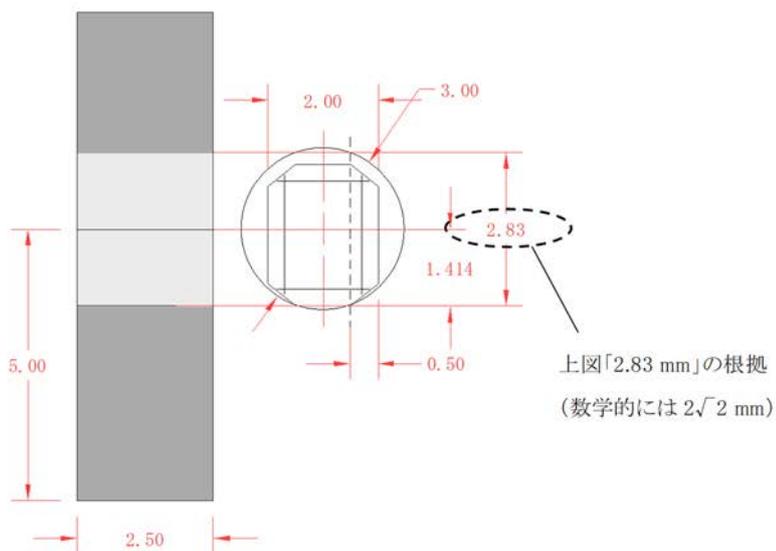
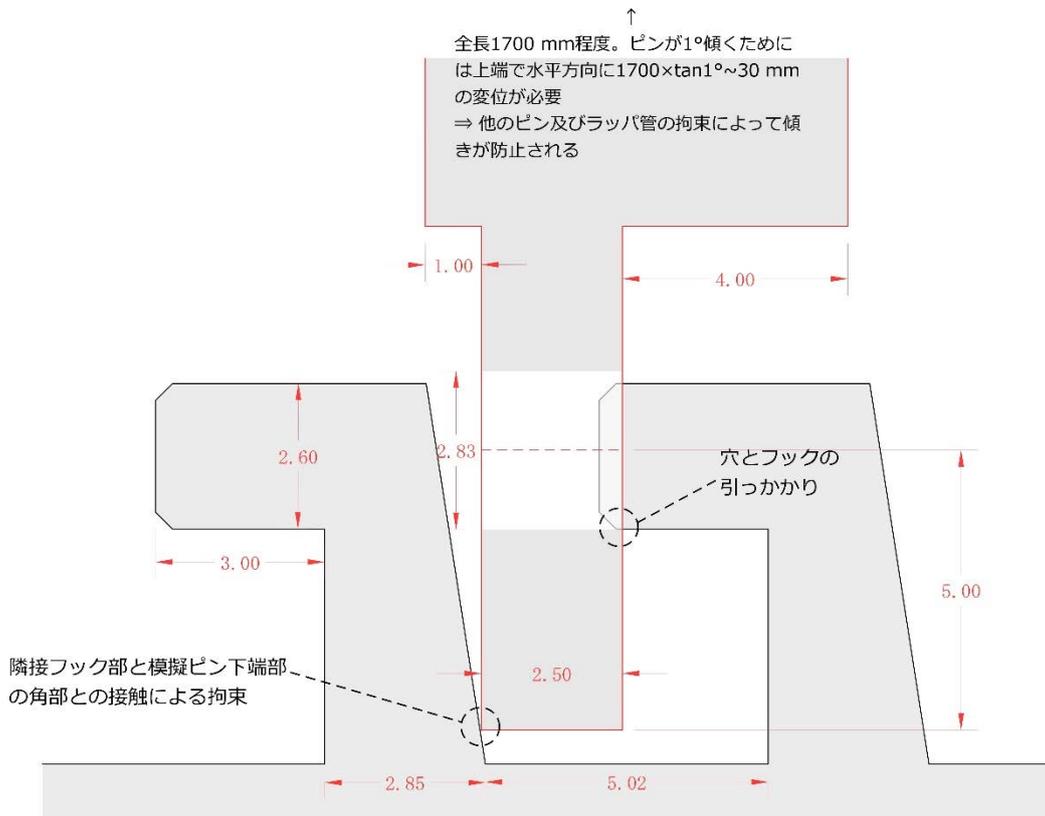
直径 7.5 mm の模擬燃料要素を採用することで、炉心燃料と比較し模擬燃料要素の相互間隙が大きくなることから、地震時の水平方向の重心移動の影響（集合体を振ると“ガラガラする”状態）が懸念された。これに関しては、もんじゅ側担当者より、メーカーの確認をとった「ラップ管の曲げ剛性が模擬燃料要素のそれよりも十分に大きいことから、群振動（及び炉心変形）解析上、間隙の大きさは無視できる」との回答があった。従って、本項に関する解析検討は特に行っていない。

(4) 構造と流路断面積の変化によるピン束部圧力損失特性の変化

炉心燃料とは構造が異なる（ピン径大、ワイヤ無し、下端部の構造、全長 2,813 mm の炉心燃料要素に比べて短尺）ため、バンドル部の圧力損失特性が変化する。但し、炉心のナトリウム流量は定格時に比較して 10% (=0.1) であるということから、（同一形状の場合には）圧力損失は 1% (=0.1²) 程度になる、従って圧力損失自体が極めて少ない状況でのみ使用される想定である。更に、発熱体ではないため冷却性を考慮しないことがある。これらの状況から、バンドル間隙（流路面積）の縮小や閉塞による影響についても特に考慮していない。

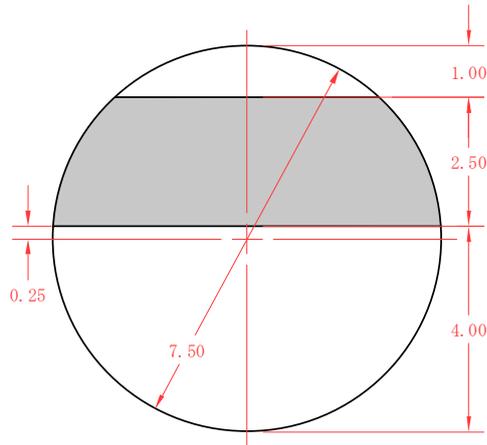
3.1.6 第一次試作を受けた検討

以上の考慮事項の状況から、ほぼ 3.1.5 (2) のみが詳細な検討事項となり、条件を満たすような模擬燃料要素下端部形状を検討した。結果、図 6 に示すように、フック部に引っ掛かる下端部厚さを 2.5 mm と厚くし、従来下部端栓や 3.1.4 節で示した第一次試作模擬燃料要素とは異なり、フック部間隙に垂直には挿入できない形状とした。すると、集合体が組み上がった後は周辺模擬燃料要素及びラップ管の拘束によって模擬燃料要素の傾きが抑制されるため、その結果隣接フック部と模擬燃料要素下端部の角部との接触による拘束を以て、模擬燃料要素はノックバーから外れない構造とした。また、模擬燃料要素断面（φ7.5 mm の円）内での下端部の位置は、模擬燃料要素の軸中心が炉心燃料要素の場合と同じ位置となるように、図 7 のように両側弓型の高さを 4.0 mm と 1.0 mm とした。



(単位 : mm)

図6 下部端栓形状が脱落を防止する原理



(単位：mm)

図7 模擬燃料要素軸中心を炉心燃料要素と合わせた場合の下端部矢視図

3.1.7 第二次試作による検討

3.1.6で定めた構造をもった模擬燃料要素の第二次試作（短尺模擬燃料要素）を行い、組み立て時の作業性を確認した。試作模擬燃料要素は表6に示すとおり、4案とした。この構造を図8～図11に示す。A1タイプは前節の第1次試作・検討から得られた基本形である。A2タイプは、下端部に面取りによるテーパを付けることにより、組み立て作業性（フック部間隙への挿入性）の向上を意図したものである。CタイプはA1タイプとの比較用で、組み立て作業性が劣る場合の措置として端部の厚みを少し減らしたものである。Bタイプは、やや本論から外れるが「φ8 mm 混在」の場合の確認用として試作したものである。

表6 第二次試験のパラメータ表

案	径	端部厚さ	下端部面取	備考
A1 (図8)	φ7.5 mm	2.5 mm	なし	基本形
A2 (図9)	φ7.5 mm	2.5 mm	あり (C0.6)	組立性向上
B (図10) 参考	φ8 mm	2.5 mm	なし	「φ8 mm」混在案の確認用
C (図11)	φ7.5 mm	2.4 mm	なし	組立性向上

この試作品による確認の結果、最も組み立て時の作業性が劣ると予想された基本形のA1タイプであっても、組み立ての作業性には大きな問題とならないことが確認された。なお、A2タイプ及びCタイプについても勿論、作業性に係る問題は確認されなかった。

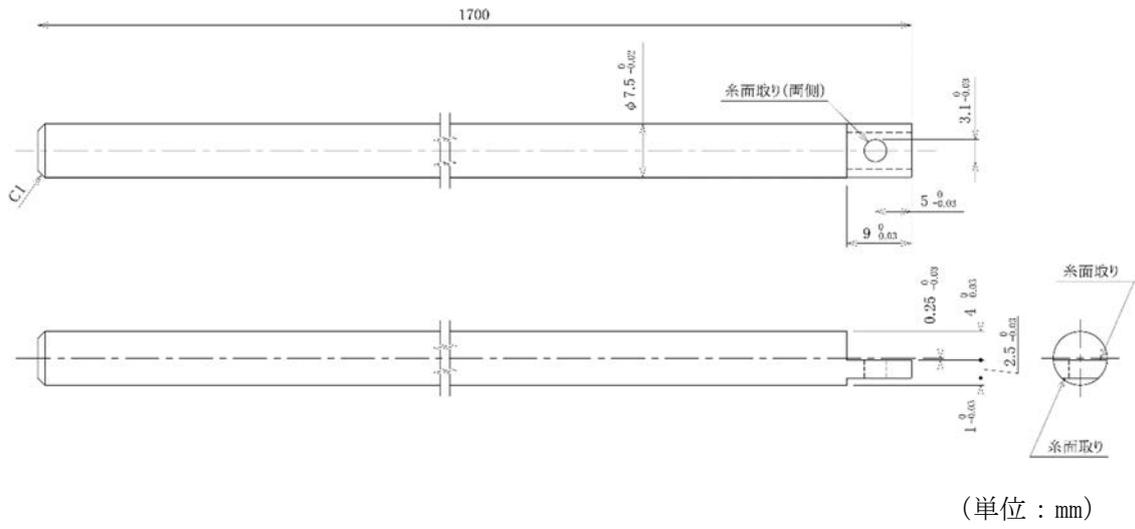


図 8 第二次試作模擬燃料要素 (A-1 タイプ)

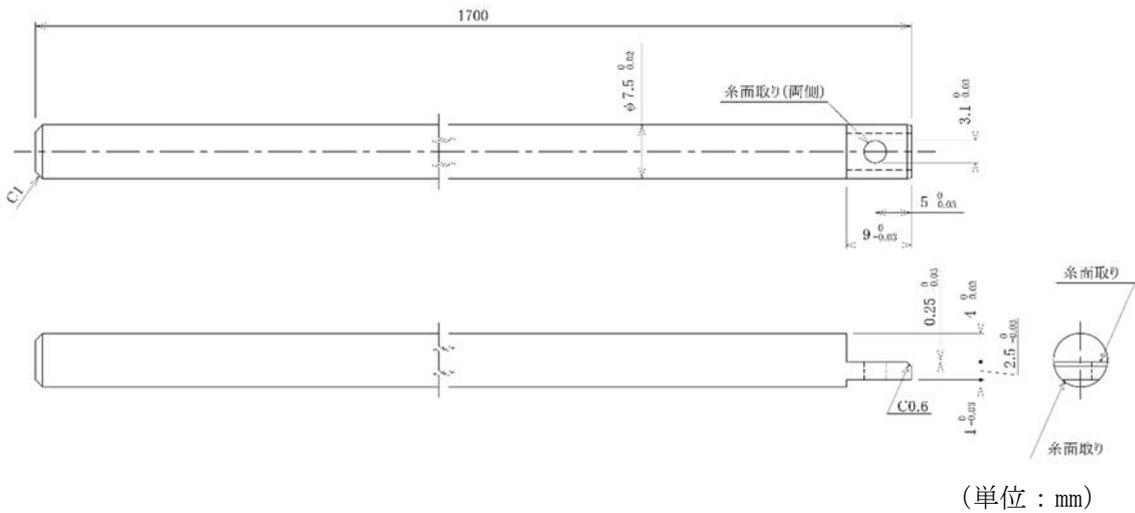
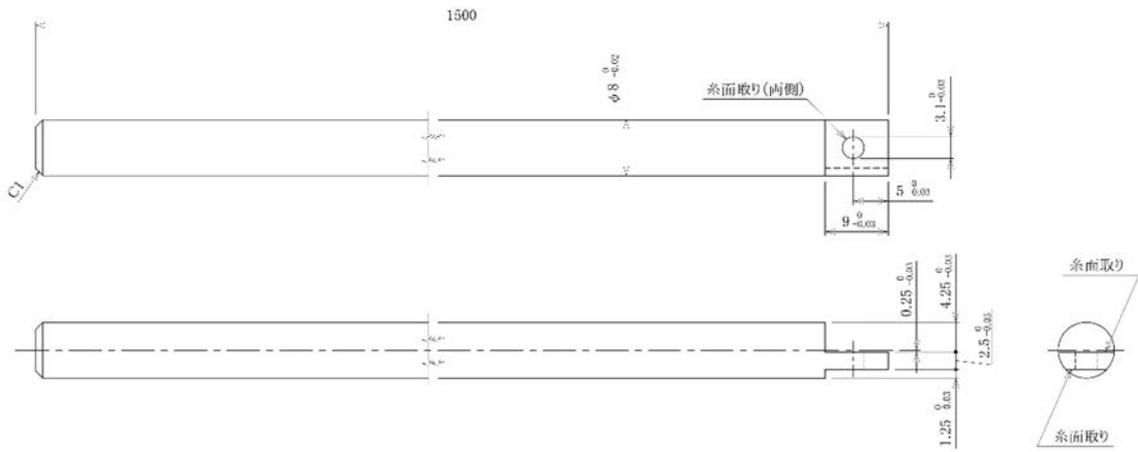
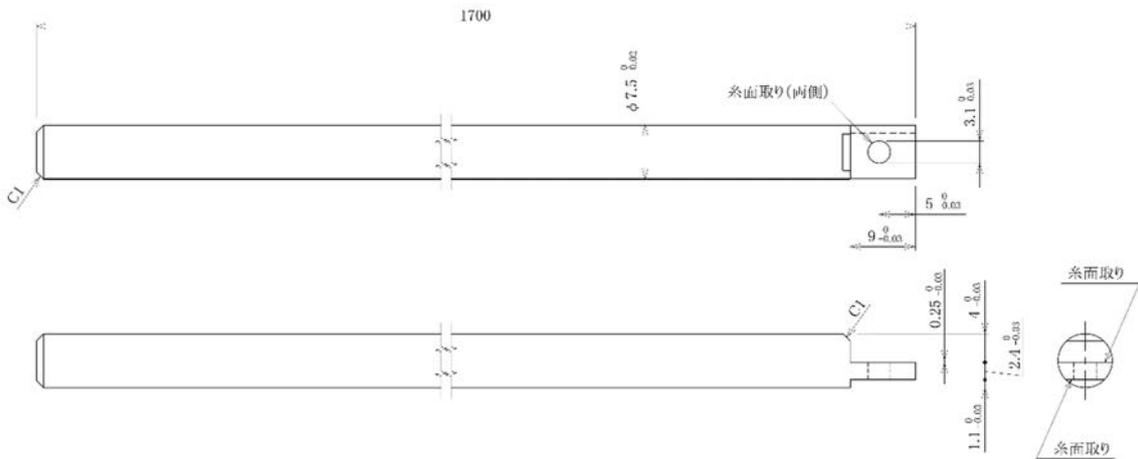


図 9 第二次試作模擬燃料要素 (A-2 タイプ)



(単位：mm)

図 10 第二次試作模擬燃料要素 (B タイプ)



(単位：mm)

※下部の C1 面取りは、4 種類の第二次試作模擬燃料要素の区別を明確にするためにつけたものであり、構造設計上の意味はない。

図 11 第二次試作模擬燃料要素 (C タイプ)

3.1.8 脱落リスクを低減するための第三次試作による検討

第二次試作の結果を受けて、更に試作を行った。これはより脱落防止能を高めるために、寸法の微調整をしたものである。図 12 に第三次試作模擬燃料要素の構造図を示す。脱落防止の観点から、図中の D 値は小さく、L 値は大きいほど良いが（図 6 参照）、一方で組み立て時の作業性への影響が懸念される。そこで、これらの値を表 7 のとおりパラメータとし試作を行った。L 値は当初製作の 5.0 mm からスタートし、ピンの傾きを考慮しても、端部がフック部のベース部分に接触しない程度の最大長さとして 5.3 mm まで 0.1 mm 単位で製作した。D 値は同じく 0.1 mm 単位で製作し、3.1 mm の他は実機の下部端栓と同様、3.0 mm をパラメータとすることとした。（パラメータの組み合わせを表 7 に示す。）なお、D 値は 2.9 mm になると、組み立ての際にフックと穴部の嵌合が困難であるという経験に基づき、これ以下の径を設定していない。この第三次試作では、実機での組み立て性を確認する目的で実長に近い 1700 mm の模擬燃料要素を、全てのパラメータにつき、各 1 本を製作した。また、同じパラメータの短尺模擬燃料要素（200 mm）を、各 2 本製作した。この実長の模擬ピンを用いて、集合体組立設備での組み立て作業性の確認試験を実施した。その結果、最も脱落リスクを抑制できる (D, L) = (3.0, 5.3) の場合に、組み立ては可能であるものの作業性（模擬燃料要素の取り回し）が負担となり、作業性が劣ることが確認された。

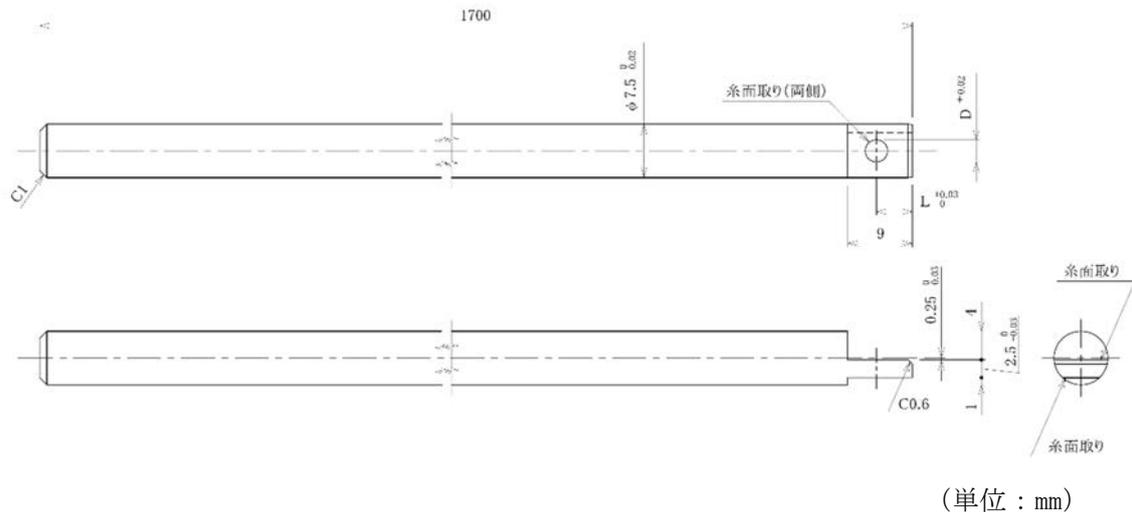


図 12 第三次試作模擬燃料要素構造

表 7 第三次試験のパラメータ表

		D (mm)	
		3.0	3.1
L (mm)	5.0	○	×
	5.1	○	○
	5.2	○	○
	5.3	○	○

全てのパラメータで短尺 (200 mm) 各 2 本、実長 (1700 mm) 各 1 本を製作

○ : 製作、× 製作せず (二次試作と同じサイズ)

次に、最外層 1 列 (図 13) に実長の試作模擬燃料要素を組み立てたところ、ラッパ管の拘束がある (傾きが大きくなならない) 条件では、いずれの条件の模擬燃料要素でも外れないことが確認された。

以上のことから、基本的に脱落防止能の観点で $(D, L) = (3.0, 5.3)$ が最良 (最も脱落リスクが低い) ではあるものの、この場合は組み立ての作業性が劣るため、集合体規模での作業性の確認行為 (例えば集合体 1 体分を先行して製作を行い、作業性が著しく劣る場合には (D, L) をより組みやすい条件に変更) が必要と考えられた。また、実際に模擬燃料要素を製作する受注業者の加工精度によっては 0.1 mm 程度の変更を想定した。

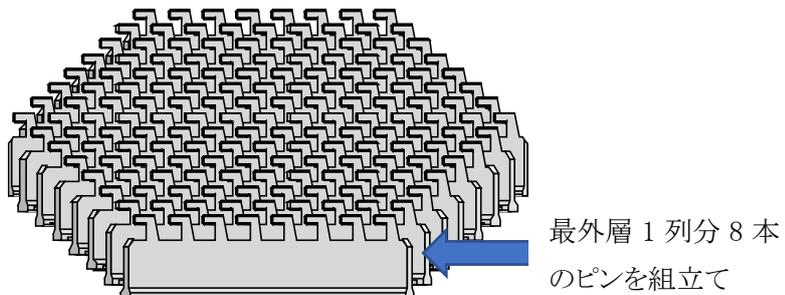


図 13 ノックバーの配置

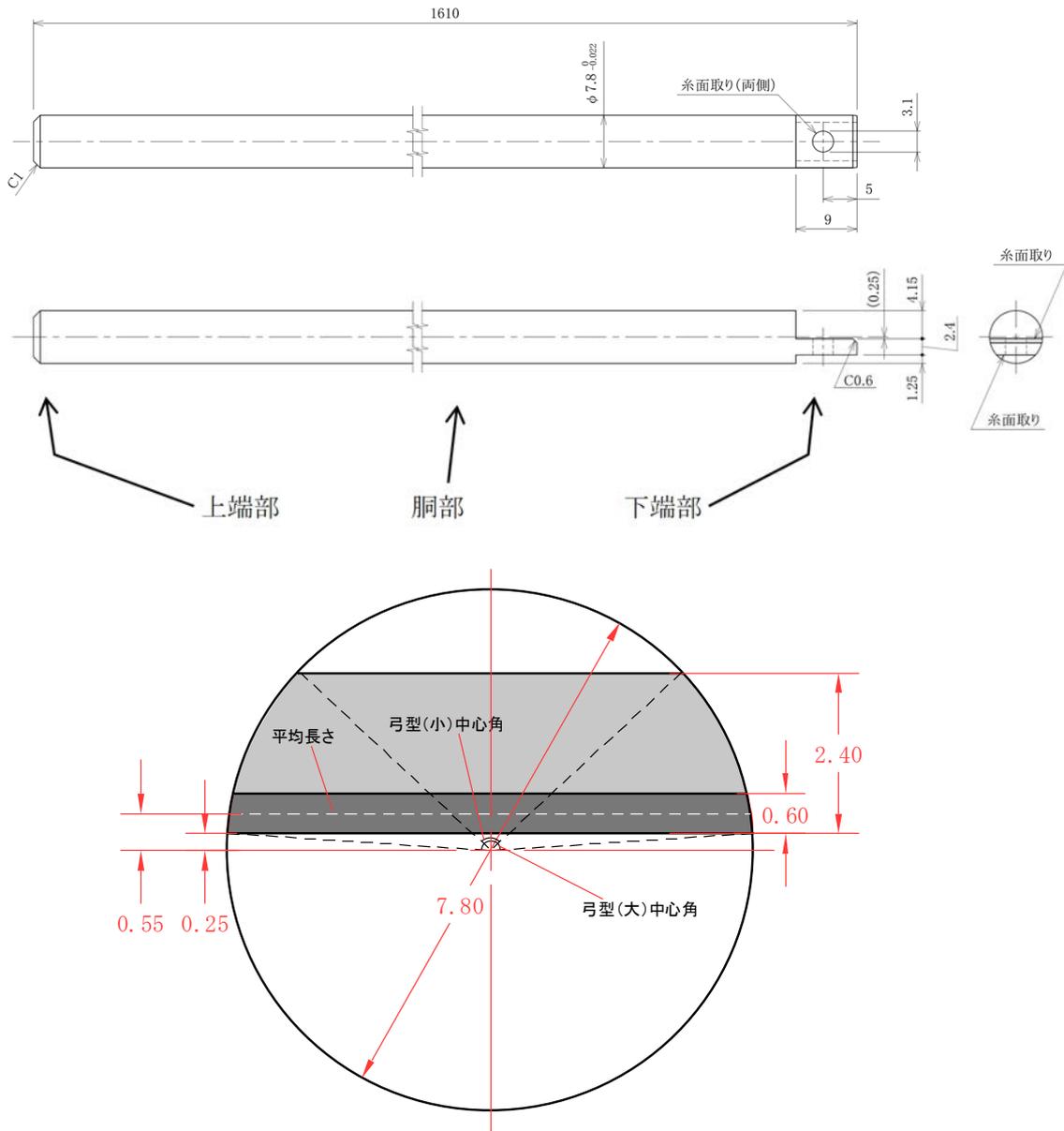
3.1.9 規格品無垢棒を用いた模擬燃料要素案のまとめ

以上、模擬燃料要素として用いるステンレス鋼棒を納期の関係から流通している規格品を用いるとする前提の下で、模擬燃料要素の構造仕様を検討した。この結果、 $\phi 7.5$ mm を全数用いることとし、脱落のリスクを最小限化するための、模擬燃料要素下端部形状を定めた。この下端部形状は、ノックバーと嵌合する穴部直径を 3.0 mm とし、穴の軸中心が下端から 5.3 mm とする形状とした。但し、組み立て作業性に影響する可能性がある。このため、その作業性が著しく劣り、納期に影響する場合には、穴径を大きくする、又は穴の中心位置を下端に近づけるなどの、作業性を考慮した仕様変更を想定した。

3.1.10 規格品でないステンレス無垢棒を用いた模擬燃料要素 ($\phi 7.8$ mm) の検討

規格品である直径 7.5 mm を前提とした検討は以上であるが、炉心燃料の被覆管径とワイヤ径を模した直径 7.82 mm 若しくはこれに近い径が調達可能である場合には、ピンの偏在が幾何学的に防止されるため、脱落リスクがほぼ無くなる。本検討中に、当初予定されていた集合体数と納期が変更されたことと、調達候補先の市場調査により、直径 7.8 mm のステンレス鋼棒の調達に見通しがついた。このため、設計上推奨する模擬燃料要素を直径 7.8 mm に変更した。これに伴い下部端栓形状の、より組み立て作業性が高い構造への再変更が可能であり、いわば第一次試作の構造 (図 3) であっても、脱落可能性の観点からは全く問題がない (軸位置をやや変更し、炉心燃料と同じとすることが推奨される)。但し、垂直挿入不可な形状を保っておくことにより組み立て作業中における脱落をある程度防止できる観点から、第二次試作における C 案である端部厚さ 2.4 mm、穴部中心位置を下端部から 5.0 mm、穴径 3.1 mm の形状とし、且つ A-2 タイプの 0.6 C の面取りを確保して挿入性を高めた。また、模擬燃料要素径の変更に伴い全長を調整した。全長は、調整単位は特に制約がないので、10 mm 単位で最も要求重量に近い値となるように 1,610 mm とした。

以上、現段階での最終案としての構造図を図 14 に示す。模擬燃料要素径のみに記載されている公差は、メーカー見積りの際の打ち合わせで提示された数値である。その他は全て JIS 中級を考慮する。模擬燃料要素の重量を算定した計算表を表 8 に示す。模擬燃料要素が 169 本で約 102.7 kg となり、従って模擬集合体重量は 179.7 kg になると推定される。



(単位 : mm)

図 14 模擬燃料要素最終案構造図

表 8 重量計算表

ピン直径			7.8	mm		
SUS304密度			7.93	g/cm ³		
上端部		体積	36.58	mm ³		
		質量①	0.2901	g		
胴部		長さ	1600	mm		
		体積	76453.8	mm ³		
		質量②	606.3	g		
下端部	全体	弓型 (大)	中心角	3.013	rad	
			面積①	21.9	mm ²	
		弓型 (小)	中心角	1.647	rad	
			面積②	4.9	mm ²	
		正味	底面積	17.00	mm ²	=②-①
			高さ	9	mm	
	体積③		152.97	mm ³	面取り無し・穴あけ無し	
	穴部		体積④	18.11	mm ³	
	C0.6面取り部 (近似)		平均長さ	7.72	mm	
			底面積	0.18	mm ²	
			体積⑤	1.390	mm ³	
	正味		体積	133.5	mm ³	=③-(④+⑤)
			質量③	1.058	g	
全体		全長	1610	mm		
		質量	607.6	g/本	=①+②+③	
			102.69	kg/バンドル		

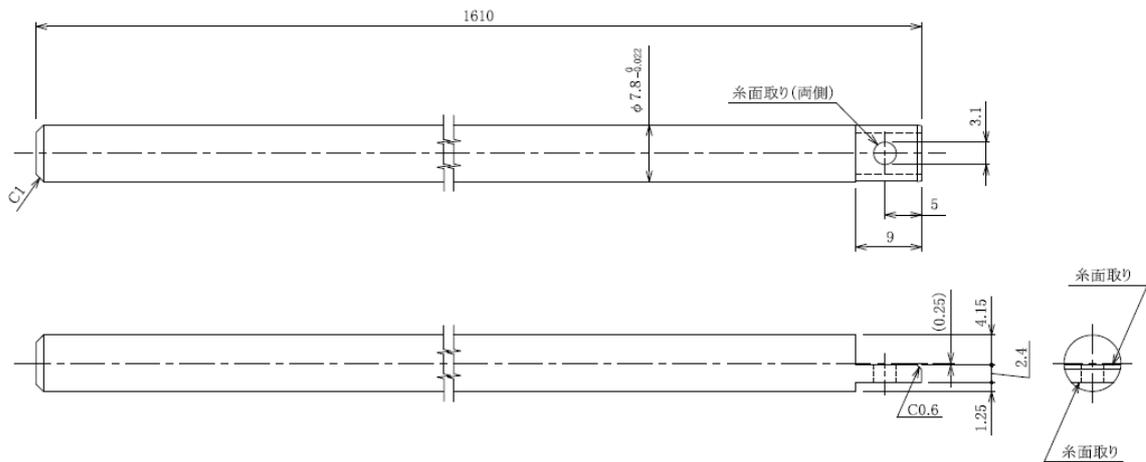
※ 上端部・胴部・下端部の別は図 14 参照。

3.1.11 曲がりについて

実長のステンレス鋼棒はその可撓性によって、一方の端部を水平に支える（片持ち梁）と他方は自重によって数センチ下がる程度に弾性変形するものの、曲がりに関しては、これまでの実績から組立て作業性にほぼ影響が無い。従って、模擬燃料要素の曲がりは、従来から炉心燃料要素の被覆管に適用している仕様「0.25 mm」であれば十分であり、これを適用する。

3.1.12 模擬燃料要素の仕様確定

前項まで模擬燃料要素設計のプルセンターにおける検討経緯の仔細を述べたが、ステンレス鋼無垢棒による模擬燃料要素製作に関し、直径 7.5 mm の棒材の調達を前提とし、もんじゅ側の要求事項（重量）を満たす他、可能な限り模擬燃料要素脱落のリスクを低減した下端部形状を考案し、推奨する模擬燃料要素の構造仕様案を策定した。その後、直径 7.8 mm ステンレス鋼棒材の調達が可能となったことから、この場合の構造仕様を検討した。直径 7.8 mm では、直径 7.5 mm で策定した下端部の形状寸法でなくとも集合体組立て後の模擬燃料要素脱落リスクはほぼ皆無になるものの、組立て作業時の脱落リスクを低減する目的で、 $\phi 7.5$ mm の場合の下端部形状を踏襲しつつ、やや組立て作業性が良い寸法に変更した案を策定した。集合体重量は模擬燃料要素の全長を 1,610 mm とした場合 179.7 kg と推定される。また、仕様が確定した模擬ピンの図 15 を作成した。



(単位：mm)

図 15 模擬燃料要素確定図

3.2 模擬集合体組部材

もんじゅ側から提示された模擬燃料集合体の条件は、重量（模擬燃料集合体 1 体あたり $180 \pm 18\text{kg}$ ）が模擬されていること、また、ハンドリングヘッド付きラップ管、エントランスノズル組立品は、もんじゅ炉心燃料集合体用の実機部材を使用することであった。以上のことから、模擬燃料集合体の製造にあたり組部材についての検討は実施していない。

4. 製造仕様書の作成

前節、3.1及び3.2の検討結果を基に製造仕様を検討し、もんじゅ模擬燃料集合体(内側炉心領域用及び外側炉心領域用)に関する仕様を定めた。以下に仕様を示す。

4.1 製造仕様

4.1.1 構成

模擬燃料集合体は、以下の構成部品によるものとする。

- (1) 模擬燃料要素（169 本）
- (2) エントランスノズル組立品
- (3) ハンドリングヘッド付ラップ管

各構成部品は、それぞれの製造仕様による。ここで、(2) 及び (3) の製造仕様、並びにエントランスノズル組立品及びハンドリングヘッド付ラップ管を構成する構成部品の仕様は、初装荷燃料Ⅲ型の製造仕様書に従うものとする。

4.1.2 種類

模擬燃料集合体は、内側炉心領域用に使用されるものと外側炉心領域用に使用されるものの二種類である。

4.1.3 識別番号

模擬燃料集合体のハンドリングヘッドには、識別番号（集合体番号）を予め刻印する。刻印寸法については、初装荷燃料Ⅲ型の製造仕様書の製造図面に従う。

4.1.4 溶接部

- (1) 引張強度（溶接施行試験）
溶接部の引張強さが室温で 520 N/mm^2 以上であること。
- (2) 断面金相（溶接施行試験）
溶接部の断面金相試験を行い、溶け込みがラップ管肉厚に達していること。
- (3) 外観（溶接施行試験・製品）
 - ① 溶接部に油、異物等の有害な付着物がなく、著しい変色がないこと。
 - ② 溶接部に割れ、きず等が認められないこと。

- ③ 有害なアンダーカットがないこと。
- (4) 寸法、形状及び重量
 - ① 全長 : 4200±5 mm
 - ② 曲がり : エントランスノズル円筒部を基準として上部パッド部で5 mm以下とする。
 - ③ ねじれ : 下部パッド～中間パッド間及び下部パッド～上部パッド間で1 mm以下とする。
 - ④ 重量 : 180±18 kg
- (5) 外観（製品）
 - ① 表面に割れ、きず等で有害なものがないこと。
 - ② 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。

5. 製品QA文書の作成

もんじゅ模擬燃料集合体の製造要領並びに模擬燃料集合体製造工程及び検査・試験工程における工程管理の要領を定め工程管理計画、模擬燃料集合体製造の工程の管理、不適合品の管理、記録の管理について要領書を作成した。

6. 製造体数

もんじゅ側より、炉に装荷する体数は120 体（内側炉心領域用60 体、外側炉心領域用60 体）との依頼を受けた。

7. 模擬燃料要素の製作

模擬燃料要素をメーカーに発注し、製造仕様書の通りの形状で製作した。なお、予備品も含め合計で20,300 本を製作した。

8. 模擬燃料集合体の製造フロー

模擬燃料集合体の製造フローを図 16 に示す。

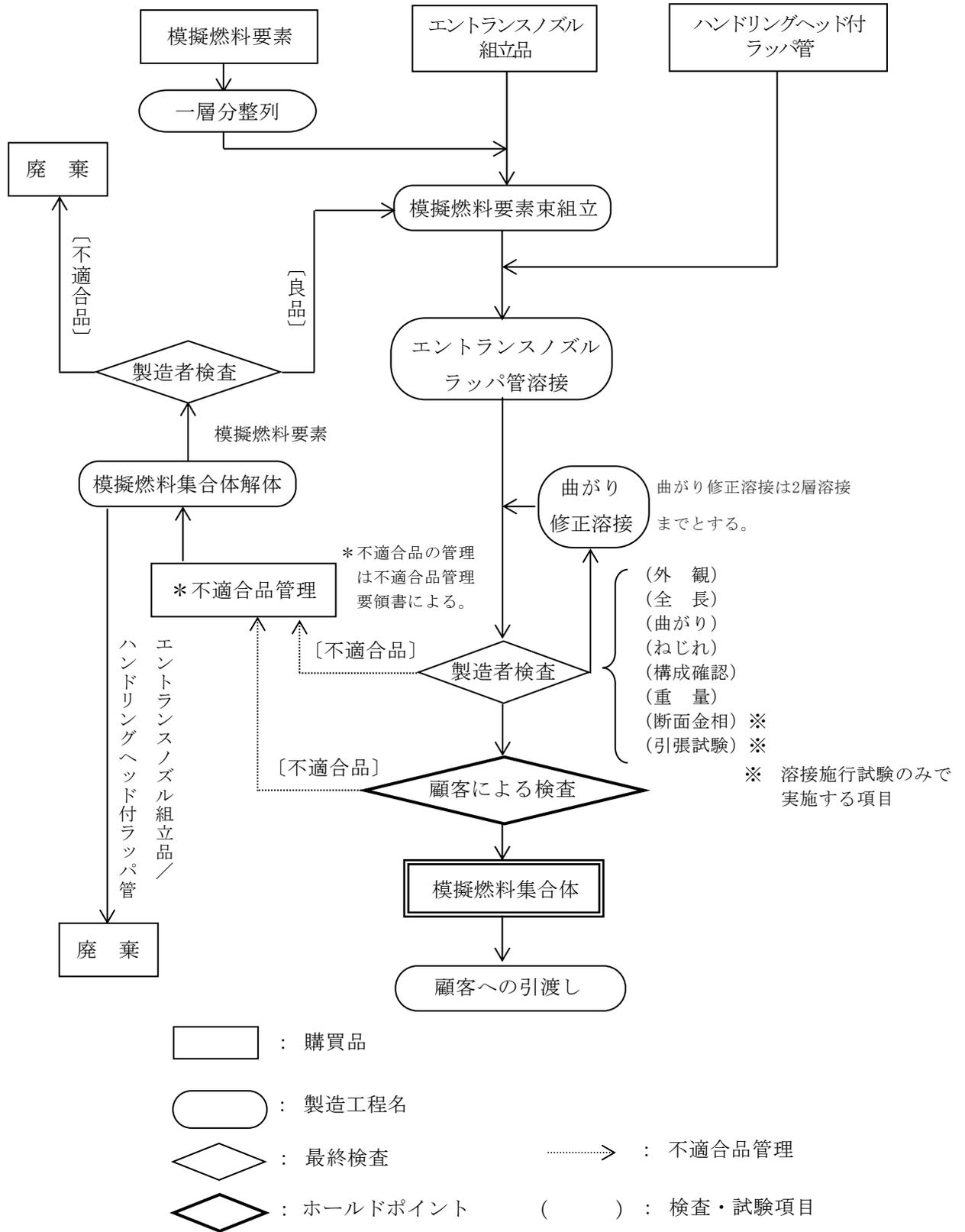


図 16 模擬燃料集合体の製造フロー図

9. 製造に伴う先行試験

9.1 本番部材を使用した模擬燃料集合体組立試験

本件の模擬燃料集合体については、既設の集合体組立設備を使用して手作業と手動操作及びモード運転を駆使して組立てを実施した。但し、既存設備では炉心燃料集合体用に設計され、構成する装置も炉心燃料要素の取り扱いに合わせたセッティング及び調整がされているため、模擬燃料要素を使用した場合にどこまで設備のモード運転が使用できるのか、手作業でやらざるを得ない工程はどこなのか、そしてどういう方法で実施することが確実に安全に作業できるか検証し、実際の組立開始前までに確立させ作業マニュアルに反映させる必要があった。

9.1.1 バンドル組立試験

実際の模擬燃料要素を用いたバンドル組立試験を行い、エントランスノズル組立品フック部からの脱落、手作業による組込みの作業性確認を実施した。その結果、バンドルに組上げた際の脱落もなく、手作業による組込作業も慣れれば問題なく実施可能であるという結果を得ることができた（図 17、図 18）。



図 17 バンドル組立 1

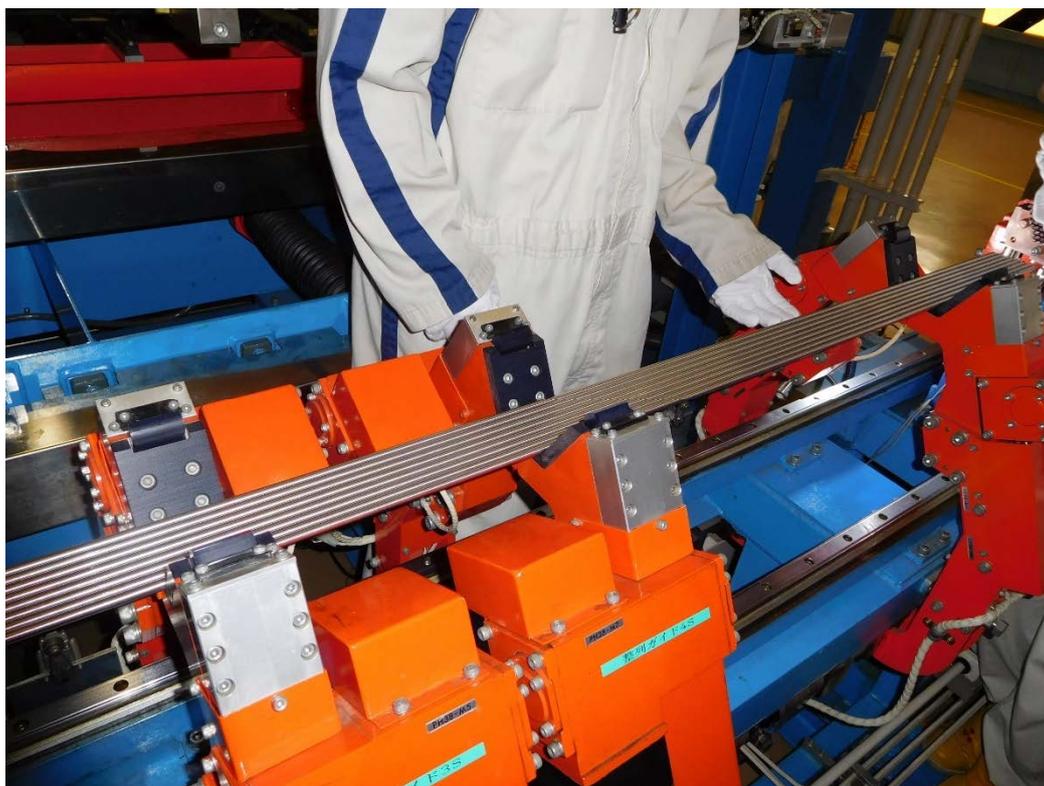


図 18 バンドル組立 2

9.1.2 ラップ管挿入試験

続いて、バンドル組立が完了した状態でラップ管の挿入試験を実施した。装置の動作は炉心燃料集合体の場合と同様に六角バンドル部分に到着直前に一時停止させ、端部（上部側）のバラツキがないことを確認した後、挿入をスタートさせた。ところが炉心燃料要素の上部端栓ほど、テーパ加工が施されていないこと、更に集合体組立設備の最も上部側の整列ガイドから約 200 mm の部分がフリー状態になっていたことからバンドルの端部が広がってしまい、ラップ管の端面に接触してしまった。ラップ管内径は 104.2 mm であり、それ以上に広がっていたと考えられる（図 19～図 26 参照）。また、ラップ管の挿入スピードも早かったため、即座に停止することができず、ラップ管端面とバンドルに組んだ模擬燃料要素が衝突する事象が発生した。

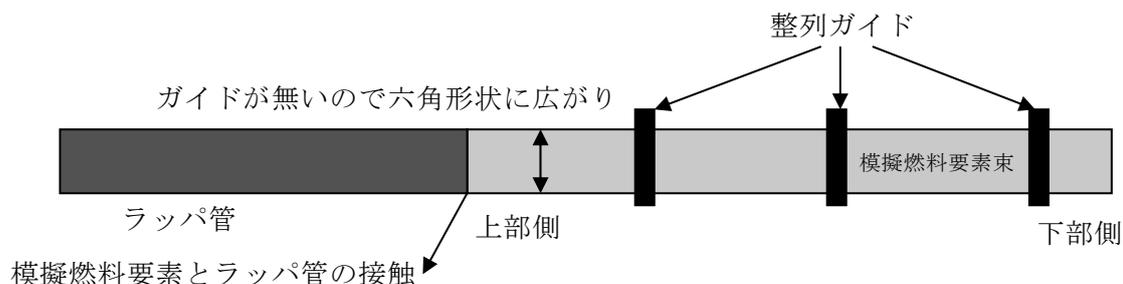
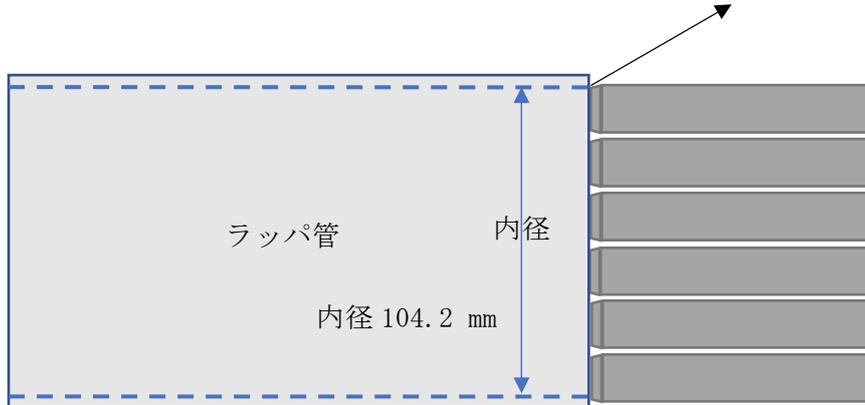


図 19 模擬燃料要素とラップ管接触イメージ図 1

先端が広がっている状態で模擬燃料要素のテーパ加工が浅いためラップ管内径がクリアできずラップ管と模擬燃料要素が接触



改善案



先端が広がっている状態でもテーパ加工しているためラップ管内径より小さくなるため燃料要素が接触しない

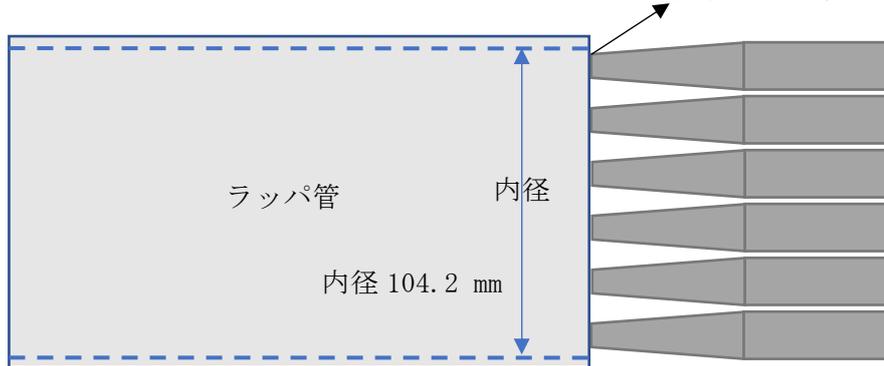


図 20 模擬燃料要素とラップ管接触イメージ図 2

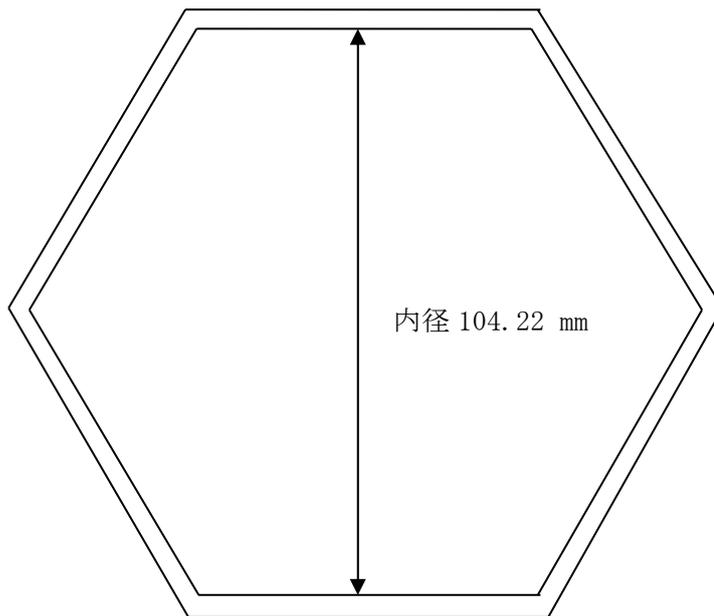


図 21 ラップ管内径イメージ図

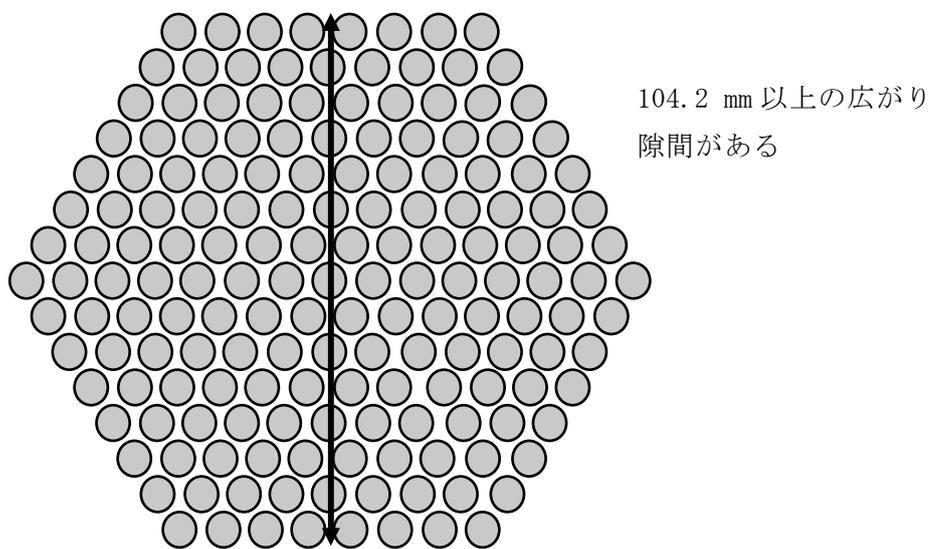


図 22 模擬燃料要素イメージ図（隙間有）

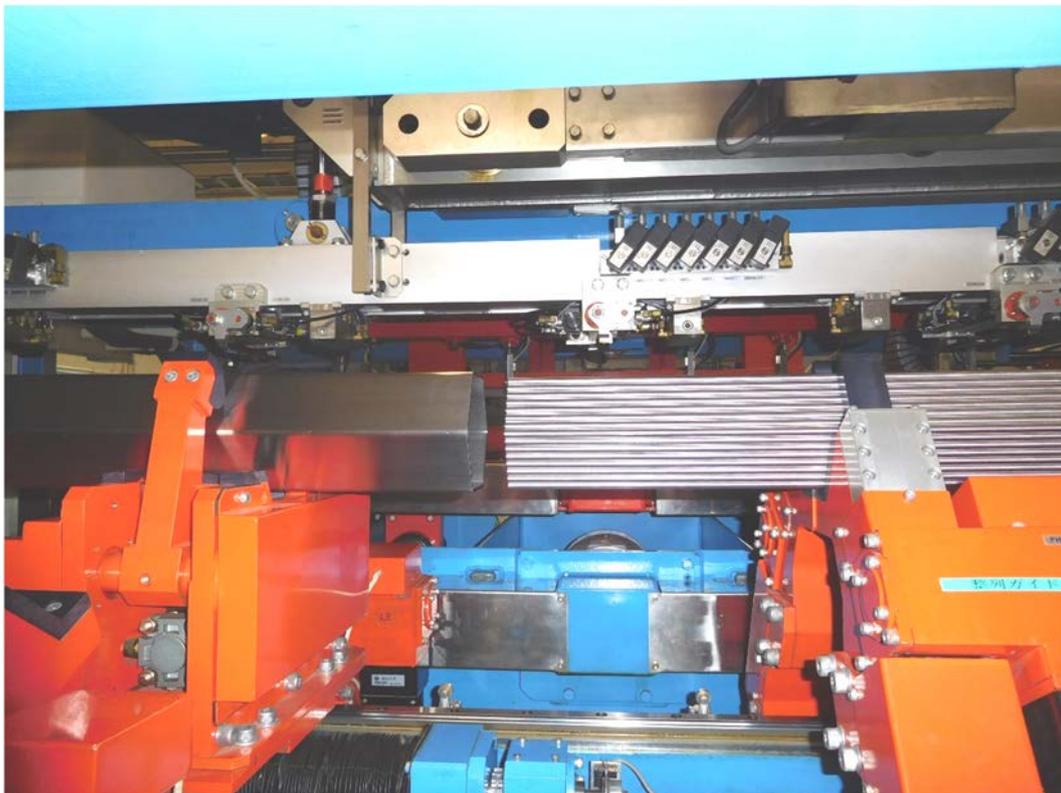


図 23 ラップ管挿入試験 1

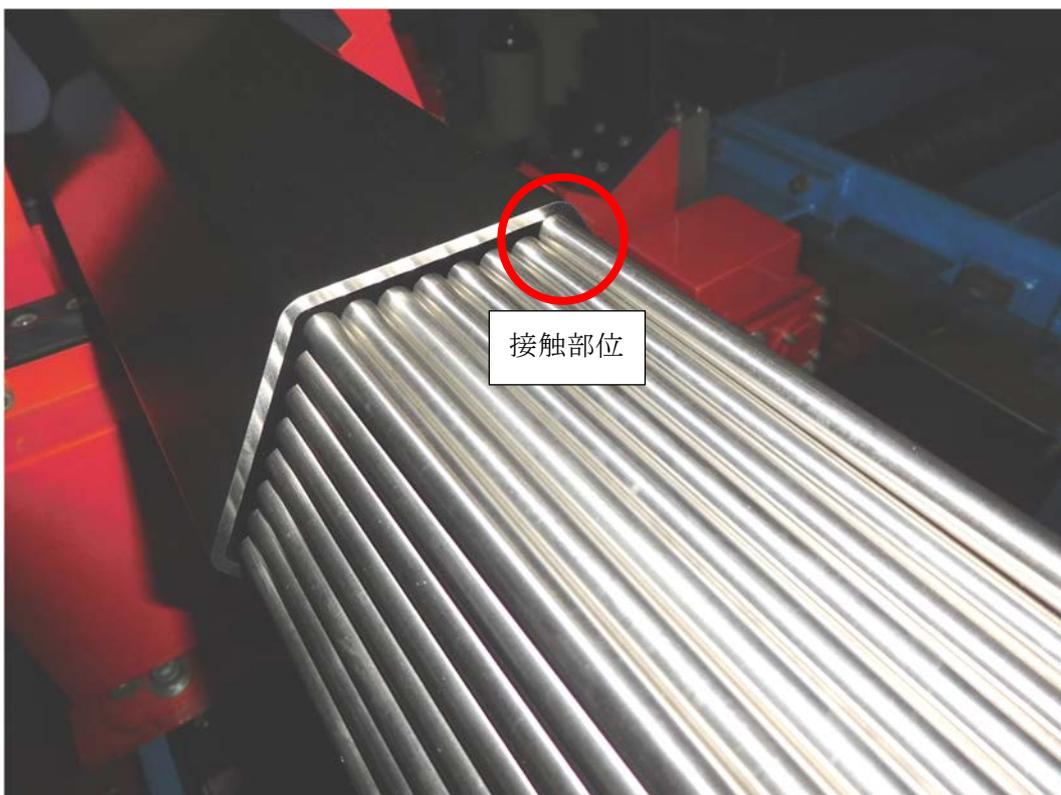


図 24 ラップ管挿入試験 2

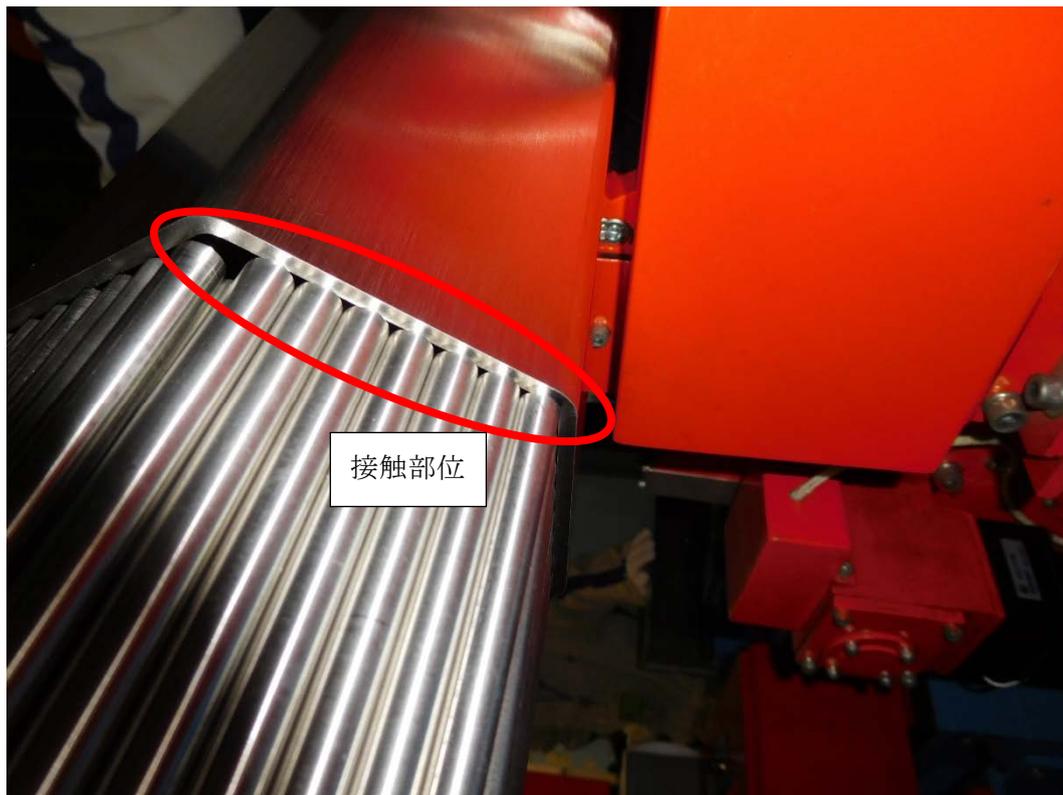


図 25 ラップ管挿入試験 3



図 26 ラップ管挿入試験 4

9.1.3 ラップ管挿入試験に発生した不具合及びその他対策

ラップ管挿入試験における不具合の対策として、模擬燃料要素の形状変更（図 20 参照）も検討されたが、発注してメーカー側も何千本と製作してしまっていることや使用変更に伴うコストが加算してしまうことから、模擬燃料要素の形状変更は断念した。しかし、模擬燃料要素のバンドル外径は、設計上最大でも 102.37 mm であること、一方ラップ管の最小内径は 104.2 mm であることから、バンドルのふくらみ（開き）拘束できれば寸法取り合いは挿入可能なため、以下の対策を施すこととした。

(1) バンドル拘束治具の考案

バンドルの膨らみを拘束する専用のバンドル押さえ治具（図 27）により、バンドル内の模擬燃料要素を密着させ、軸方向の上部側、中間、下部側の三ヶ所に取り付け、六角穴付ボルトを締めることでバンドルの広がりを防止し、ラップ管の内径 104.2 mm 以上にならないよう改善した。これにより、ノギスで測定した結果ラップ管内径を超えるものは発生せず挿入可能なことを確認した（図 27～図 32 参照）。

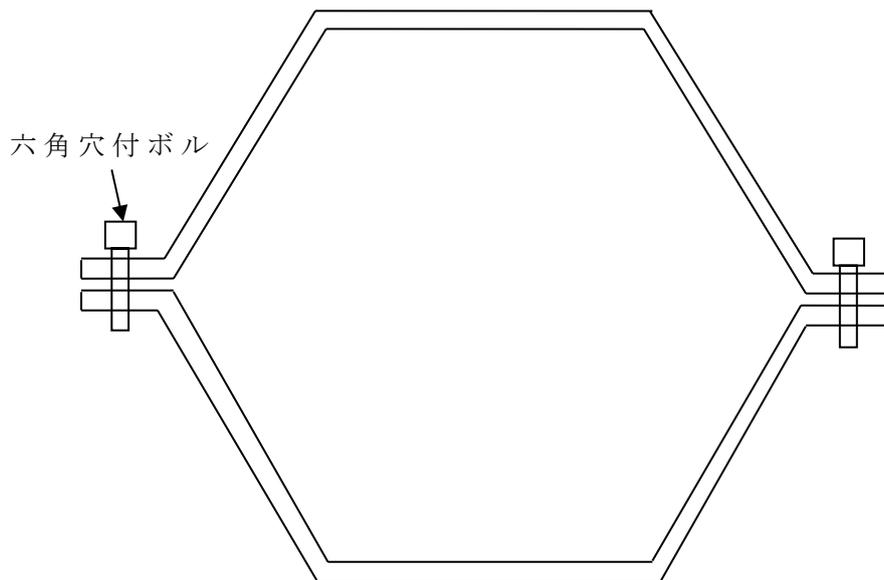


図 27 バンドル押さえ治具

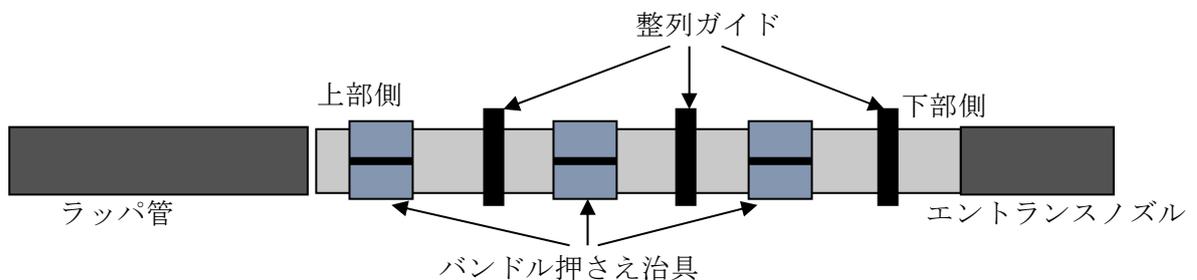


図 28 バンドル押さえ治具取付図

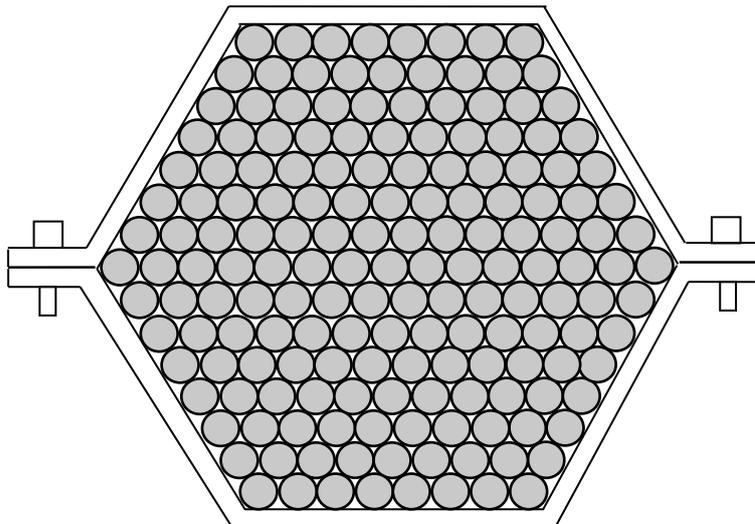


図 29 バンドル押さえ治具取付図模擬燃料要素収束イメージ図（広がり防止）

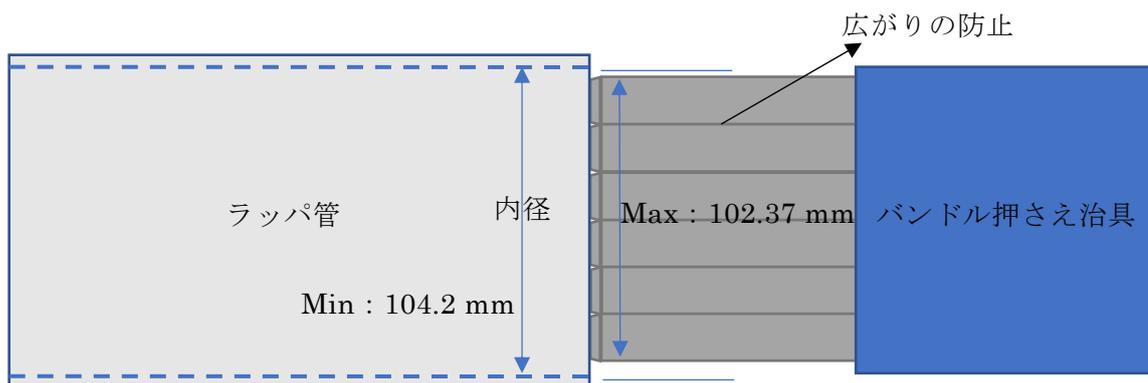


図 30 ラッパ管挿入イメージ図

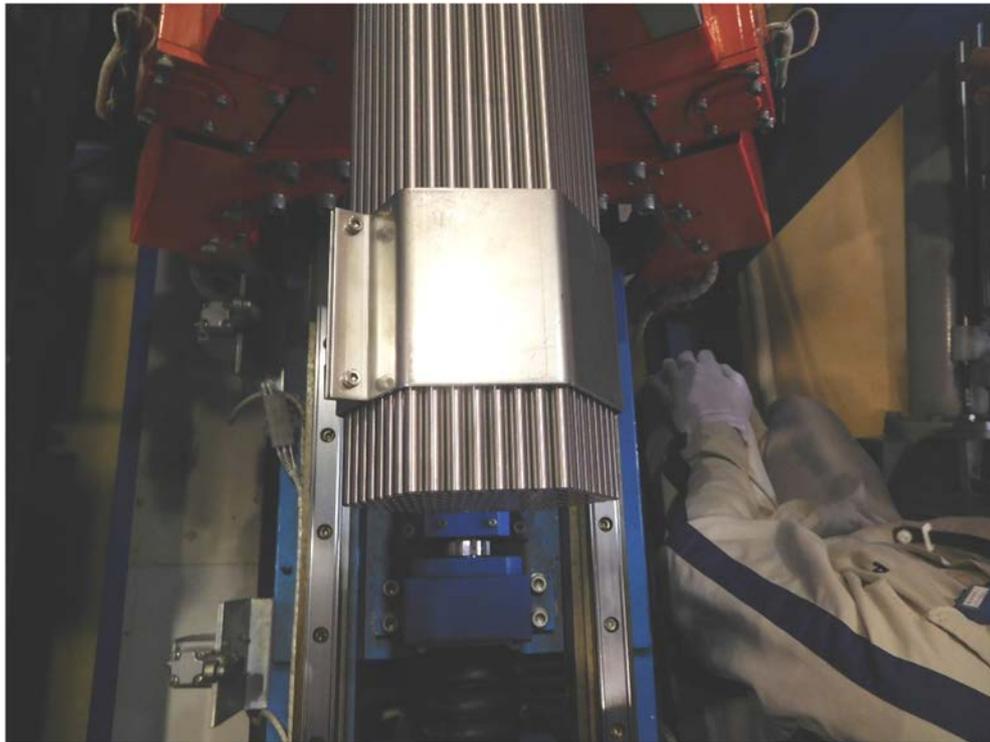


図 31 バンドル押さえ治具取付 1

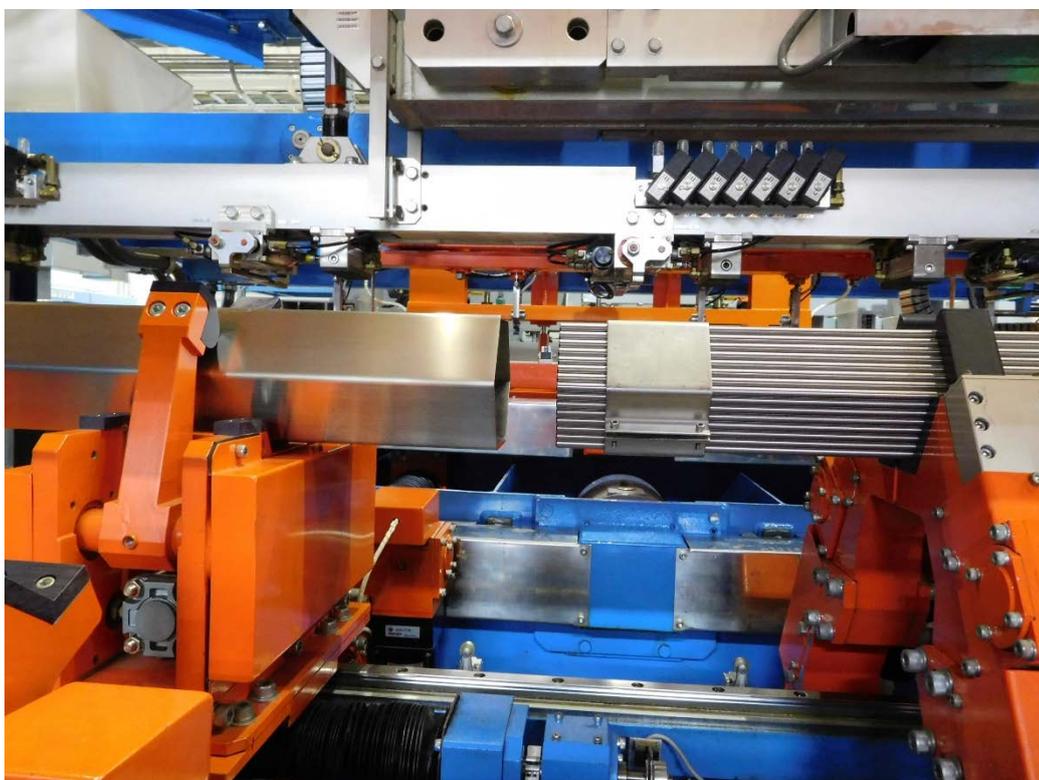


図 32 バンドル押さえ治具取付 2

(2) ラップ管内へのバンドル挿入時の作業手順の変更

ラップ管内へバンドルを挿入する場合は、以下の手順で行うマニュアルを変更した。

- ①バンドル組み終わった後バンドル押さえ治具を取り付ける。
- ②ノギスを用いてバンドル径を測定し、ラップ管内径以下であることを確認する（図 33 参照）。
- ③バンドル先端をラップ管内へ挿入後、バンドル押さえ治具を取り外す。これを繰り返し、バンドルの挿入を完了させる（図 33 参照）。



図 33 バンドル押さえ治具取付後ノギスによる寸法検査

(3) その他改善点

ラップ管挿入試験の結果を元に、集合体組立設備に以下の対策を行った。また、その他懸念された項目についても、模擬集合体の組立てが円滑に実施できるよう対策を施した。詳細は以下の通りである。

①ラップ管挿入速度の調整

現状、手動運転でラップ管挿入を行うには挿入スピードが速く（中高速域を使用）、更に模擬燃料要素はワイヤが巻かれていないことから、ラップ管内面に接触する面積が多くなり、ラップ管挿入時の負荷が増すことが予想された。このため、下表 9 に示すラップ管挿入スピード及び挿入時過負荷検出アンプについて調整を行い、ラップ管挿入速度を現状より遅くした。

表 9 ラップ管挿入速度調整（ラップ管前後用モータ）

ラップ管挿入速度	速度調整	過負荷検出アンプ
低 速	調整せず	調整せず
中 速	約 30 %減	感度調整
高 速	約 40 %減	感度調整

②模擬燃料要素・全数組込完了回路の新設

全自動運転で集合体組立を行った場合、集合体組立設備のシーケンスプログラム上で「全数組込完了」フラグが ON し、組立完了の認識を持つことができるが、手作業で模擬燃料要素を全数組立てた場合、全数組込完了の認識を持つことができず、集合体組立設備のインタロック機能が働き次のステップ動作に移行することができない。このため、「模擬燃料要素・全数組込完了」ボタンを設備の操作盤に設け、模擬燃料要素が 169 本組込完了時の設備状態（起動条件）が整った場合のみ、本ボタンを ON することでその認識を持たせ、スムーズに次のステップ動作に移行できるようシーケンスプログラムの変更を行った。

③整列ガイド誤操作防止機能の追加

前述のバンドル押さえ治具を取り付け、これを外しながらラップ管挿入を行う場合、ラップ管挿入の進捗に合わせて、バンドル形状を担保する「整列ガイド」を手動操作で「開」するが、整列ガイドは 1S～5S までの 5 箇所あるため、作業者の操作ミスで順番と違う整列ガイドを「開」してしまうと、バンドル形状が崩れたり、近傍の作業者が整列ガイドに挟まれてしまうおそれがあった。これを未然に防止するため、シーケンスプログラム上の整列ガイド 1S～5S「開」タイミング回路を見直し、誤操作しても整列ガイドが動作しないようインタロック機能を追加した。

④集合体移送アーム取合位置確認機能の追加

模擬集合体の組立では、通常自動運転で行うラッパ管挿入を、すべて手動運転（ラッパ管保持「開」状態、手作業含む）で行うことから、模擬集合体を起こし装置までハンドリングする集合体移送アームが、正常な位置で模擬集合体を掴むことができるか懸念された。このため、「集合体移送アーム下降監視タイム検出」をシーケンスプログラムに追加し、集合体移送アームが模擬集合体を掴む直前に動作を停止させ、集合体移送アームと模擬集合体の取合位置を目視確認できるようにした。

⑤溶接実績読込指令の簡素化

炉心燃料集合体製造時における集合体の溶接は、全自動運転による「溶接モード」で行っていたため、溶接完了後にシーケンスプログラム上での「溶接実績読込指令」が機能し、加工組立工程計算機に溶接実績データを自動送信できていたが、模擬集合体の組立では手動運転のためこれが機能しなかった。このため、「溶接モード」を起動しなくても、溶接作業後の設備状態（起動条件）が整った場合のみ「溶接実績読込指令」が ON となり、確実に円滑に加工組立工程計算と信号授受が行えるよう、シーケンスプログラムの変更を行った。

- (4) 設備を運転する際は、全自動運転ではなく、全て手動運転で実施し、ポイント毎に設備を止め、確認しつつ作業できるようマニュアルを見直した(図 34、35 参照)。

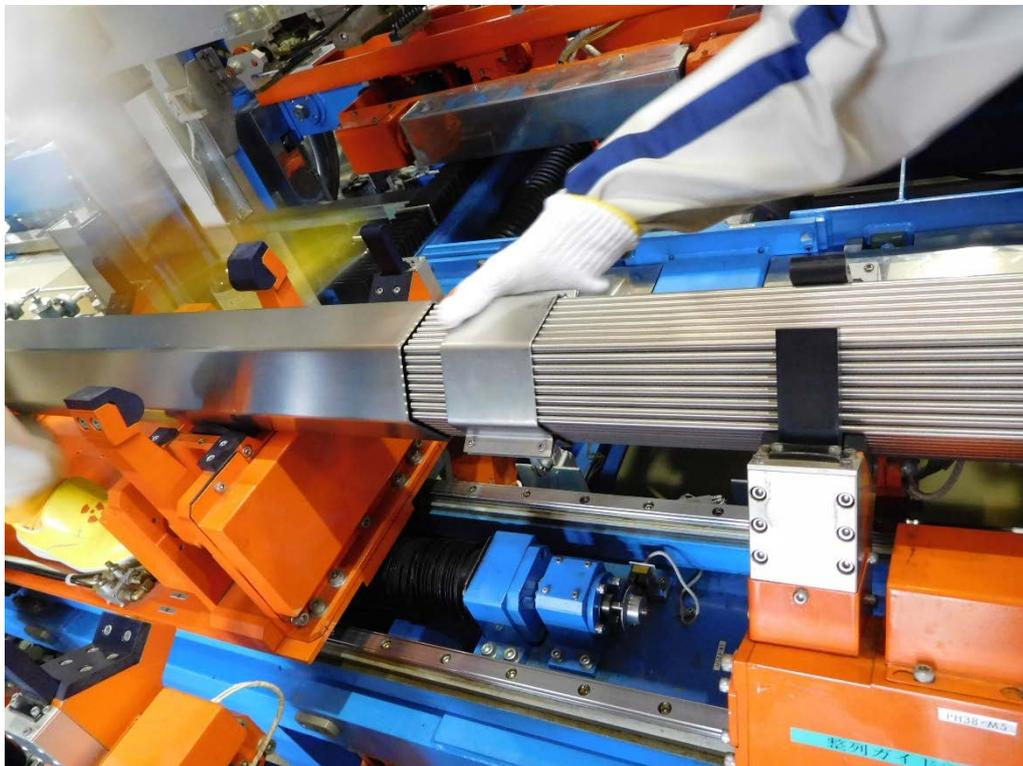


図 34 手動操作でのラップ管挿入の様子 1

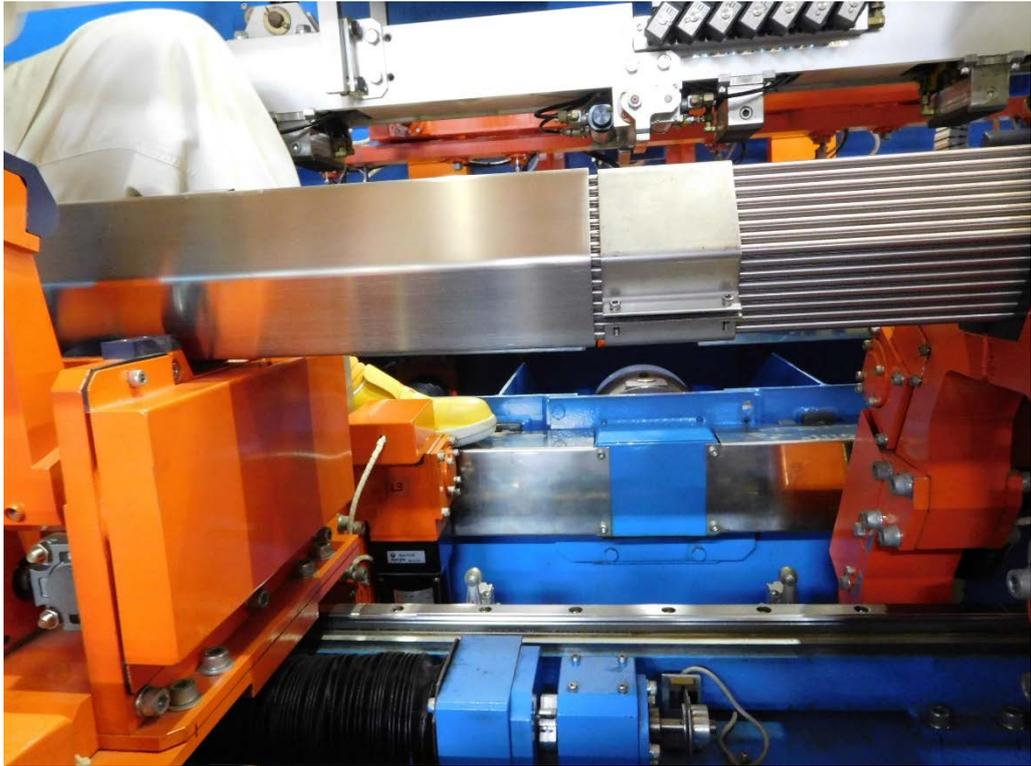


図 35 手動操作でのラップ管挿入の様子 2

9.2 ラップ管・エントランスノズル溶接施行試験

溶接施行試験については、製品 QA のもんじゅ模擬燃料集合体製造工程管理要領書に従い、炉心燃料集合体のラップ管・エントランスノズル溶接と同様の手順で実施した。下表 10 にラップ管・エントランスノズル溶接施行試験結果を示す。なお、溶接施工試験は、購入回の異なる部材を使用したため、それぞれに対し実施するとともに、曲がりが発生した場合の修正（当該面のみ重ね溶接を施し、熱収縮を利用し曲がり修正）溶接についても併せて実施した。まず、ビード外観については、硫黄含有量の少ない第 3 回購入部材は溶け込み量が浅くなる傾向があり、溶接電流を高く設定したため、太めの溶接ビードとなった（図 39～図 41 参照）。溶け込み量についても従来からの傾向どおり、第 2 回購入の部材は比較的深く、第 3 回購入の部材はラップ管肉厚を若干超える程度であったが判定基準を満たした溶接が可能であることを実証した（図 36～図 38 参照）。

表 10 ラップ管・エントランスノズル溶接施行試験結果表

購入回数	電流値	溶接部外観	引張試験	金相試験
		判定基準： 溶接部に有害な傷、割れ、付着物がないこと	判定基準： 破断荷重 \geq 520 N/mm ²	判定基準： \geq ラップ管肉厚 (溶け込み)
第 2 回	図 36 参照	結果：合格 図 38 参照	613.5 N/mm ² 結果：合格	結果：合格 図 37 参照
第 3 回	図 39 参照	結果：合格 図 41 参照	579.6 N/mm ² 結果：合格	結果：合格 図 40 参照

溶接施行試験申請No. MG-SE-1 溶接条件表 (第2回購入部材：日本ステンレス直江津製造所)

No.1 トーチ (A→B→C面)

開始条件	ベース電流	ピーク電流	溶接時間
	(A)	(A)	(sec)
1	60	60	1.0
2	70	70	1.0
3	80	80	1.0
4	80	80	0.0

終了条件	ベース電流	ピーク電流	溶接時間
	(A)	(A)	(sec)
1	15	15	1.0
2	15	15	1.0
3	10	10	1.0
4	10	10	1.0

溶接電圧：10～30V

No.2 トーチ (D→E→F面)

開始条件	ベース電流	ピーク電流	溶接時間
	(A)	(A)	(sec)
1	60	60	1.0
2	70	70	1.0
3	80	80	1.0
4	80	80	0.0

終了条件	ベース電流	ピーク電流	溶接時間
	(A)	(A)	(sec)
1	15	15	1.0
2	15	15	1.0
3	10	10	1.0
4	10	10	1.0

溶接電圧：10～30V

※注 ガス1：アルゴン、ガス2：ヘリウム

設定値	共通条件	設定値
0.0	溶接開始位置	0.0
15.0	ラップ長さ (mm)	15.0
0.0	スタートEX (mm)	0.0
30	溶接速度 (mm/分)	30
1500	空走速度 (mm/分)	1500
1.5	ガス1流量 (ℓ/分)※	1.5
12	ガス2流量 (ℓ/分)※	12
3.2	電極径 (φ)	3.2
トリタン	種類	トリタン
90°	角度	90°
6.0	ブリフロー (秒)	6.0
6.0	アフタフロー (秒)	6.0
約-0.5	電極狙い位置 (mm)	約-0.5
約3	ギャップ (mm)	約3
コーナ	スタート位置	コーナ

ベース電流	ピーク電流	溶接速度	パルス	個別条件	位置	ベース電流	ピーク電流	溶接速度	パルス
(A)	(A)	(mm/分)	周波数Hz	位置	本溶接条件	(A)	(A)	(mm/分)	周波数Hz
25	90	30	2.0	A	コーナ	25	90	30	2.0
45	105	30	2.0	B	1 面目	45	105	30	2.0
25	90	30	2.0	C	コーナ	25	90	30	2.0
40	100	30	2.0	D	2 面目	40	100	30	2.0
25	90	30	2.0	E	コーナ	25	90	30	2.0
35	95	30	2.0	F	3 面目	35	95	30	2.0
25	90	30	2.0	G	コーナ	25	90	30	2.0
50	50	30	0.0	H	ダウンスロープ条件)	50	50	30	0.0
40	40	30	0.0	H	ダウンスロープ条件)	40	40	30	0.0
30	30	30	0.0	H	ダウンスロープ条件)	30	30	30	0.0
20	20	30	0.0	H	ダウンスロープ条件)	20	20	30	0.0
15	15	30	0.0	H	ダウンスロープ条件)	15	15	30	0.0

●バックシールドガス(溶接時)：アルゴンガス (10ℓ/分)

●溶接時間トータル：約7分

図 36 溶接条件 (第2回購入)

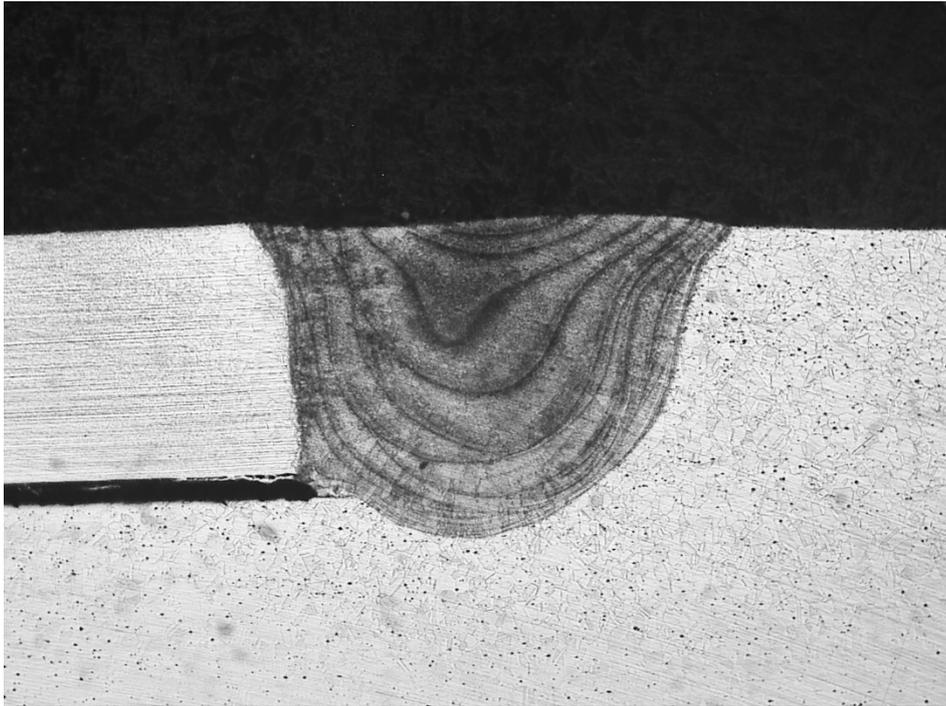


図 37 溶接ビード部溶け込み (第 2 回購入)



図 38 溶接ビード部外観 (第 2 回購入)

溶接施行試験申請No. MG-SE-2 溶接条件表 (第3回購入部材：大同特殊鋼)

No.1 トーチ (A→B→C面)				No.2 トーチ (D→E→F面)						
開始条件	ベース電流	ピーク電流	溶接時間	設定値	共通条件	設定値	開始条件	ベース電流	ピーク電流	溶接時間
	(A)	(A)	(sec)					(A)	(A)	(sec)
1	60	60	1.0	0.0	溶接開始位置	0.0	1	60	60	1.0
2	70	70	1.0	15.0	ラップ長さ(mm)	15.0	2	70	70	1.0
3	80	80	1.0	0.0	スタートEX(mm)	0.0	3	80	80	1.0
4	80	80	0.0	30	溶接速度(mm/分)	30	4	80	80	0.0
				1500	空走速度(mm/分)	1500				
				1.5	ガス1流量(l/分)※	1.5				
				12	ガス2流量(l/分)※	12				
				3.2	電極径(φ)	3.2				
				トリタン	種類	トリタン				
				90°	角度	90°				
				6.0	プリフロー(秒)	6.0				
				6.0	アフタフロー(秒)	6.0				
				約-0.5	電極狙い位置(mm)	約-0.5				
				約3	ギャップ(mm)	約3				
				コーナ	スタート位置	コーナ				

終了条件	ベース電流	ピーク電流	溶接時間	終了条件	ベース電流	ピーク電流	溶接時間
	(A)	(A)	(sec)		(A)	(A)	(sec)
1	15	15	1.0	1	15	15	1.0
2	15	15	1.0	2	15	15	1.0
3	10	10	1.0	3	10	10	1.0
4	10	10	1.0	4	10	10	1.0

ベース電流	ピーク電流	溶接速度	パルス	個別条件	ベース電流	ピーク電流	溶接速度	パルス
(A)	(A)	(mm/分)	周波数Hz	位置	(A)	(A)	(mm/分)	周波数Hz
45	100	30	2.0	A	45	100	30	2.0
70	120	30	2.0	B	70	120	30	2.0
45	100	30	2.0	C	45	100	30	2.0
65	115	30	2.0	D	65	115	30	2.0
45	100	30	2.0	E	45	100	30	2.0
55	105	30	2.0	F	55	105	30	2.0
45	100	30	2.0	G	45	100	30	2.0
50	50	30	0.0	H	50	50	30	0.0
40	40	30	0.0	H	40	40	30	0.0
30	30	30	0.0	H	30	30	30	0.0
20	20	30	0.0	H	20	20	30	0.0
15	15	30	0.0	H	15	15	30	0.0

●バックシールドガス(溶接時)：アルゴンガス (10l/分)

●溶接時間トータル：約7分

図 39 溶接条件 (第3回購入)



図 40 溶接ビード部溶け込み (第 3 回購入)



図 41 溶接ビード部外観 (第 3 回購入)

10. 模擬燃料集合体の組立

10.1 組部材の準備

模擬集合体の組部材は、玉造部材検査所（現在は閉鎖）から輸送し、現在は、プルトニウム燃料第三開発室 ATR 棟に保管されている。

そこで ATR 棟開口部まで部材収納容器を人手で移動させ、ユニック付きトラックによりプルトニウム燃料第三開発室ローディングドックへ運搬、搬出入室(2)への移載後、仮置きした。ここまです品質管理課が担当した。

そこから部材準備室までの運搬、コンベヤ搬送用集合体部材パレットへの積み込み、自動搬送及び集合体組立設備への部材セットは、試験第2課が担当した。

なお、設備にハンドリングヘッド付きラップ管及びエントランスノズル組立品をセットした後の部材番号と異物混入の有無は、品質管理課が確認し、外観（傷、変形、汚れの有無）は、試験第2課が確認し、作業記録（品質記録）を残すこととした。

10.2 模擬燃料要素の準備

模擬燃料要素は製作メーカーで木箱に収納された状態で納品され、プルトニウム燃料第三開発室の搬出室（2F）で品質管理課から試験第2課へ引渡しとなる。その後、模擬燃料集合体の組立スケジュールに合わせて組立検査室に電動搬送台車を用いて運搬を実施した。運搬完了後は、輸送容器保管棚と集合体梱包設備間のスペースに段積み状態で一時保管することとした。また、模擬燃料集合体の組立に使用する模擬燃料要素の番号と木箱の番号を確認した後、集合体検査設備（常陽）東側のスペースに当該木箱を一時仮置きし、組立毎に収納された模擬燃料要素を取り出す手順とした（図 42 参照）。



図 42 模擬燃料要素収納木箱

10.3 模擬燃料要素の汚染検査

現場の作業者は加工組立工程計算機運転員と当日に使用する模擬燃料要素の木箱内の位置番号を照合した後、バンドルー層分の必要本数を取り出し、模擬燃料要素表面のダイレクトサーベイ及びスミヤ法による汚染検査を実施する。なお、スミヤ法で採取したろ紙は、全ての層に係るスミヤ採取が完了した時点で放射線管理第1課に測定を依頼し、表面汚染がないことを確認した（図43参照）。



図43 汚染検査の様子

10.4 バンドル組立

作業員2名が集合体組立設備（現保管体組立設備）内に立入る。それぞれのポジションは主作業員（模擬燃料要素の先端をエントランスノズル組立品のフック部に引っ掛ける）は、概ねエントランスノズル組立品と角バー挿入装置の間に、補助作業員（模擬燃料要素の後ろ端を持ち主作業員の作業を補助）は、整列ガイド装置 3-2 と吸着パットの間とした。

次に、汚染検査を担当した作業員から一層分の模擬燃料要素を受け取り、整列ガイド装置に仮置きする。一本ずつ取り出しながら加工を施した先端をフック部に引っ掛けていく。なお、引っ掛ける順番は、操作盤側のフックから順に行った（図 44～図 46 参照）。

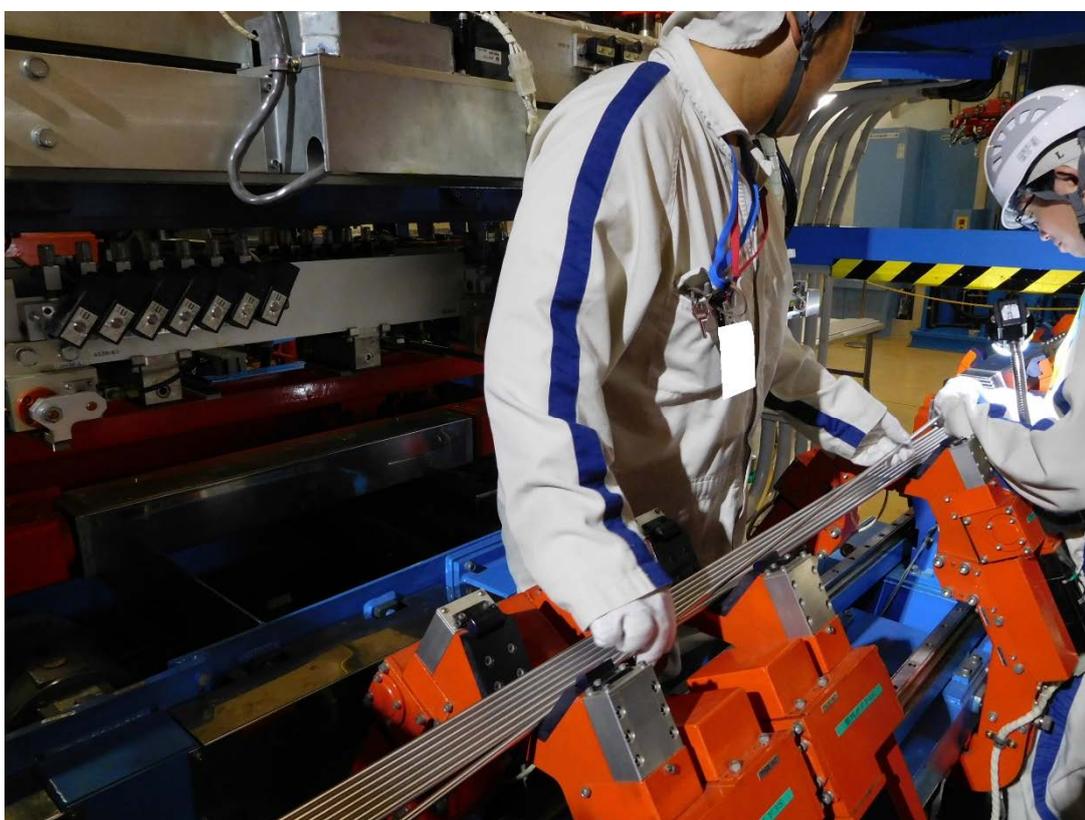


図 44 バンドル組立の様子 1

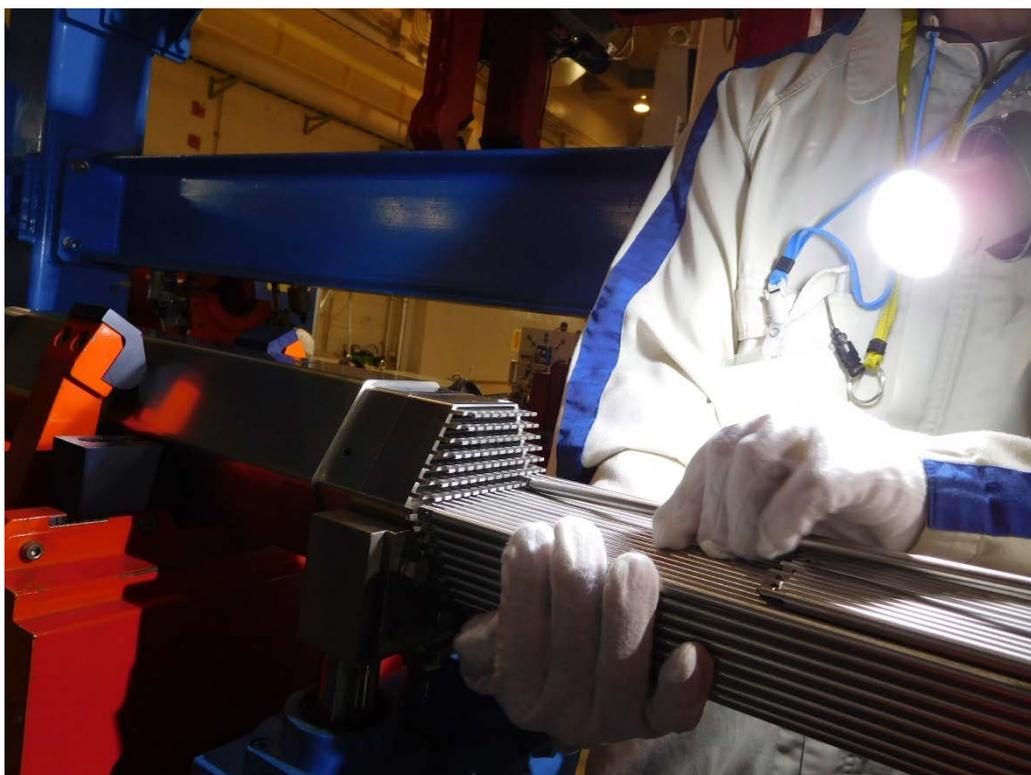


図 45 バンドル組立の様子 2

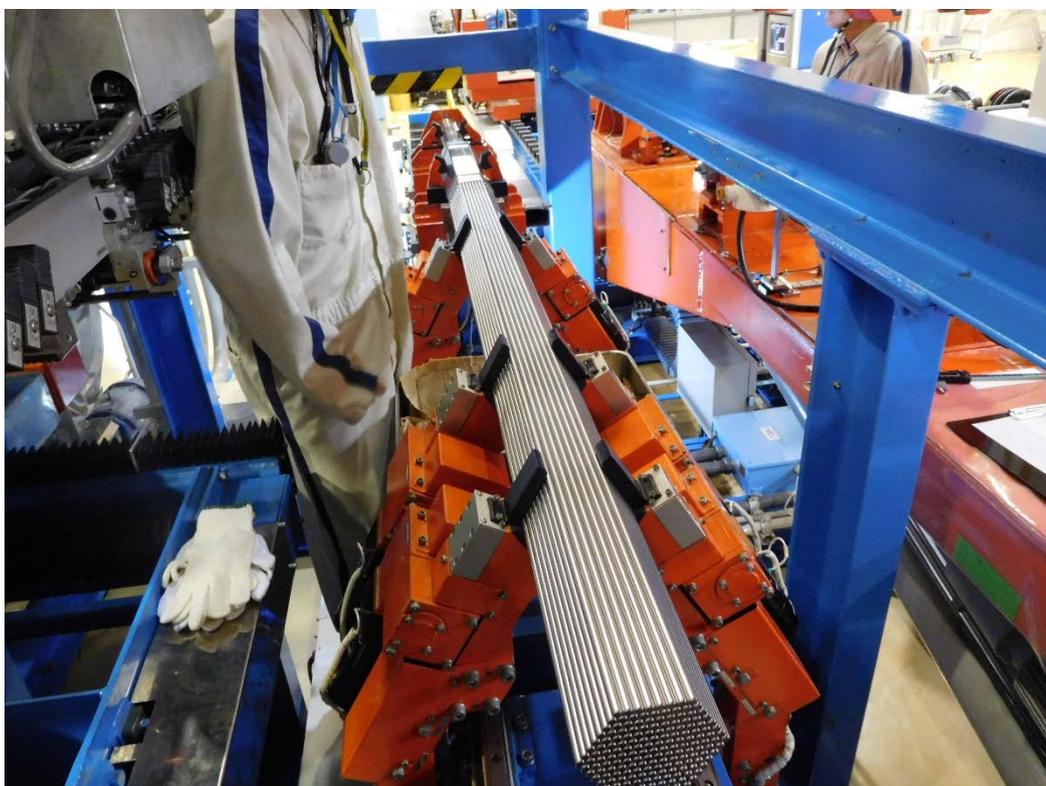


図 46 バンドル組立の様子 3

10.5 模擬燃料要素の組込状態確認

15 層のバンドル組立が完了したら、バンドル押え治具を下部側、中間部、上部側の三箇所に取り付け、模擬燃料要素の組込部分と上部側の六角部分を写真撮影し、必要な本数が組み込まれていることのエビデンスとした。なお、撮影時には識別ができるよう模擬燃料集合体の番号を記載したボードと一緒に撮影することとした。また、バンドルの対面間距離がラップ管の内面寸法 (104.2 mm) 以内であることをトレーサビリティを取得したノギスを用いて確認した (図 47～図 50 参照)。

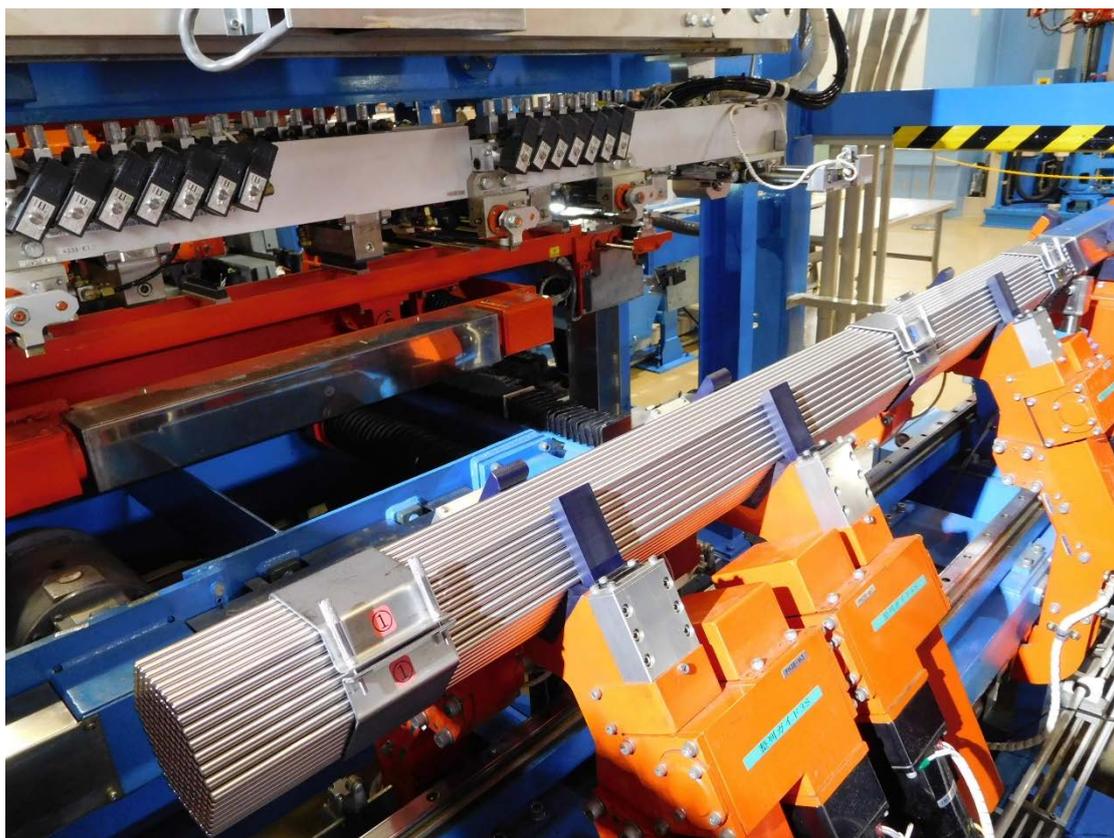


図 47 模擬燃料要素組込確認の様子 1



図 48 模擬燃料要素組込確認の様子 2



図 49 模擬燃料要素組込確認の様子 3



図 50 模擬燃料要素組込確認の様子 4

10.6 ラップ管の挿入

ラップ管の挿入は、挿入スピードを遅くし、すべて手動運転で実施した。また、炉心燃料集合体の組み立てとは異なり、模擬燃料要素の長さが短いため、六角バンドルのラップ管挿入開始部分がエントランスノズル方向側が変わった。

また、模擬燃料要素の端部は面取り加工を施しているものの、実機の上部端栓とは異なりラップ管端部と接触する可能性も考えられたことから、集合体組立設備のシーケンスプログラムを一部改造し、設備動作を変更することで対応した。

なお、六角バンドル先端部への挿入にあたっては、作業者の手作業により行うことでリスク回避を図った。その後、バンドル押え治具の取り外し、整列ガイド装置の開放及びラップ管挿入装置の前進を交互に行うことで挿入を完了させた（図 51～図 55 参照）。

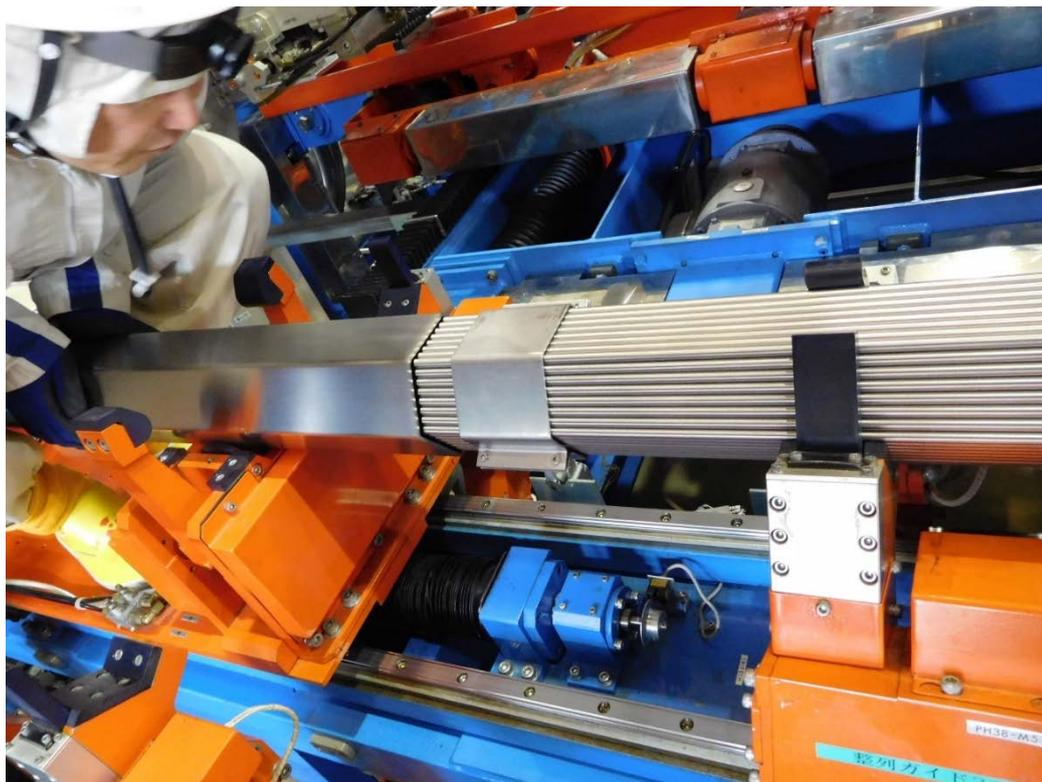


図 51 ラップ管挿入の様子 1



図 52 ラップ管挿入の様子 2

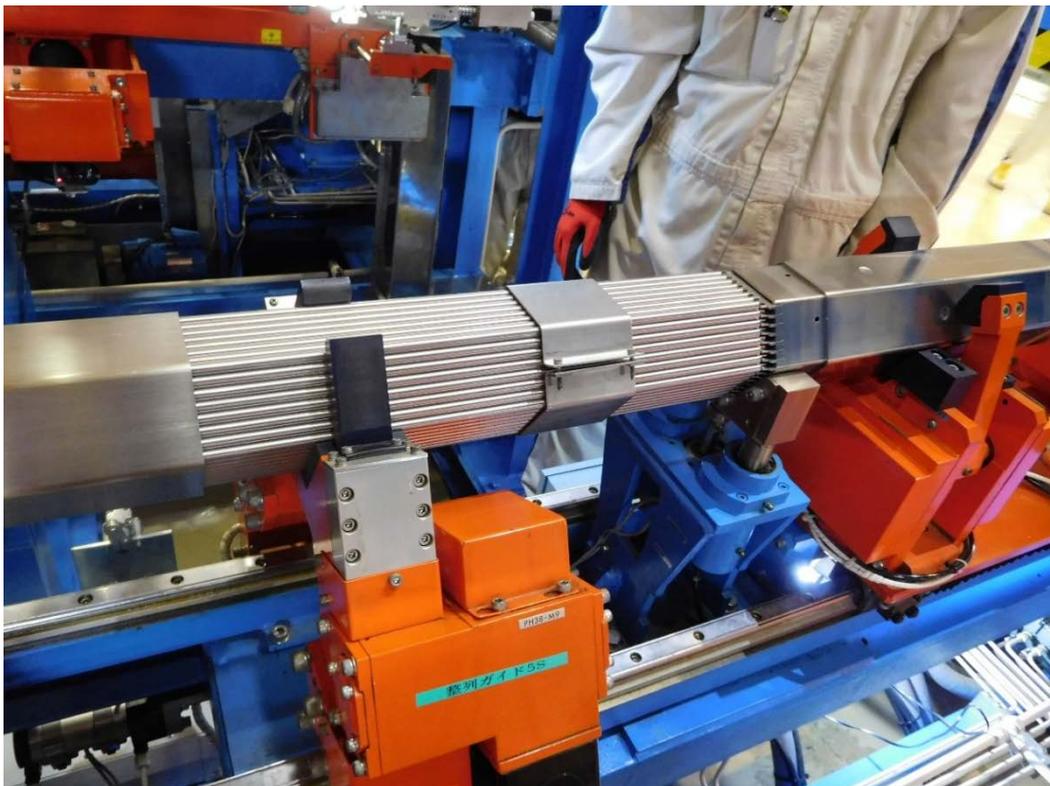


図 53 ラップ管挿入の様子 3

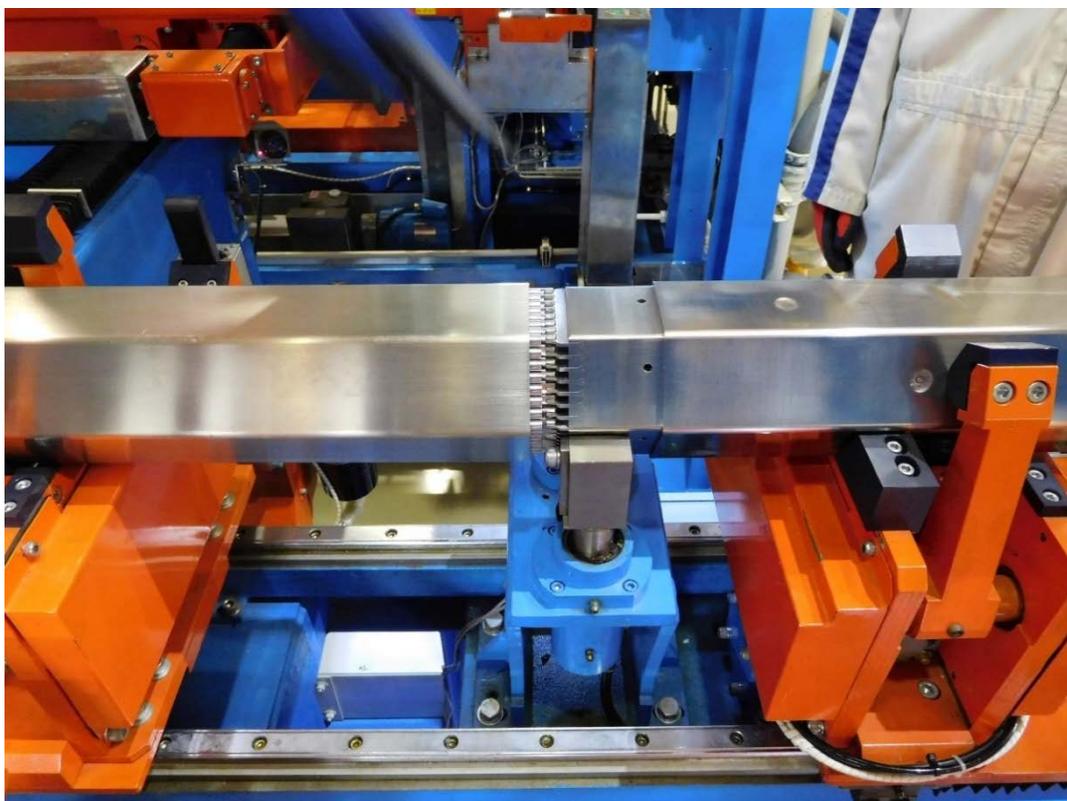


図 54 ラップ管挿入の様子 4

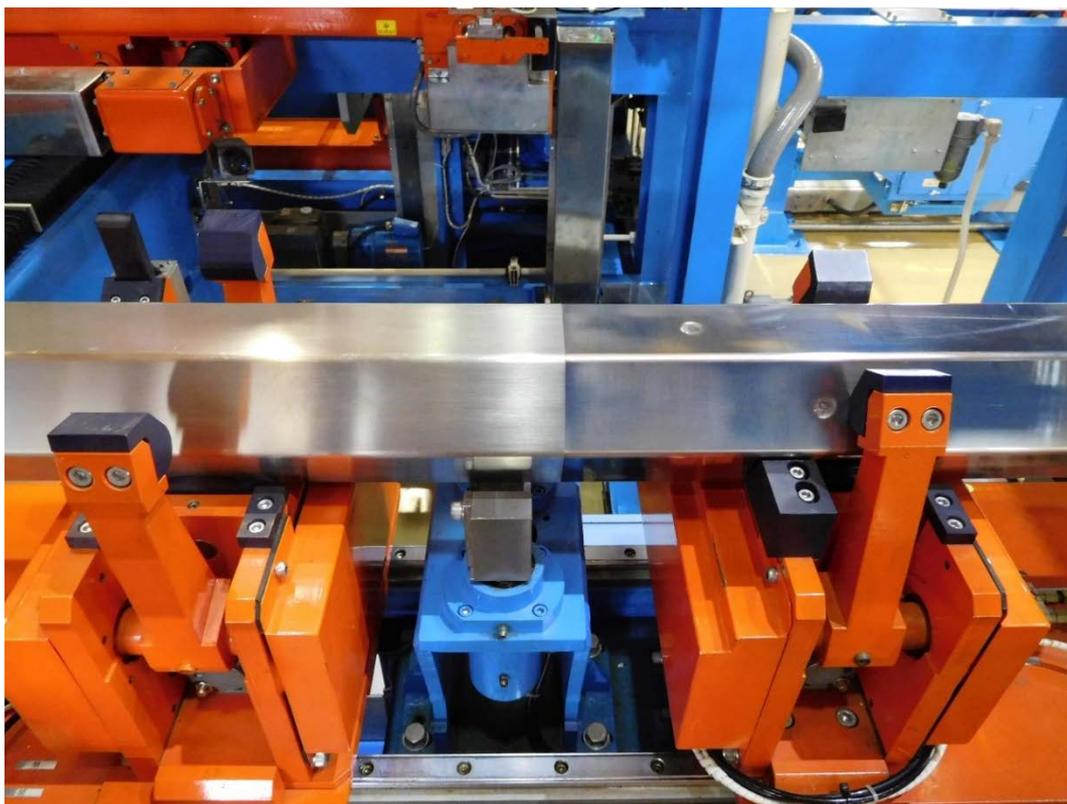


図 55 ラップ管挿入の様子 5

10.7 ラップ管・エントランスノズル溶接

品質管理課の外観確認終了後、模擬燃料集合体を集合体起こし装置に移載し、垂直状態とする。その後、電極位置のセッティングを行い、自動溶接を行った。溶接後は、ワイヤブラシにて酸化被膜の除去を行った。

この溶接に関し、今回の模擬燃料集合体部材には、第2回購入品と第3回購入品が混在することとなったため、それぞれに適した溶接条件を使い分ける必要があり、誤った溶接条件の使用を防止するため、実際の溶接開始前に溶接装置の設定を品質管理課と試験第2課の双方による確認を行った（図56～図61参照）。



図 56 ラップ管・エントランスノズル溶接の様子 1

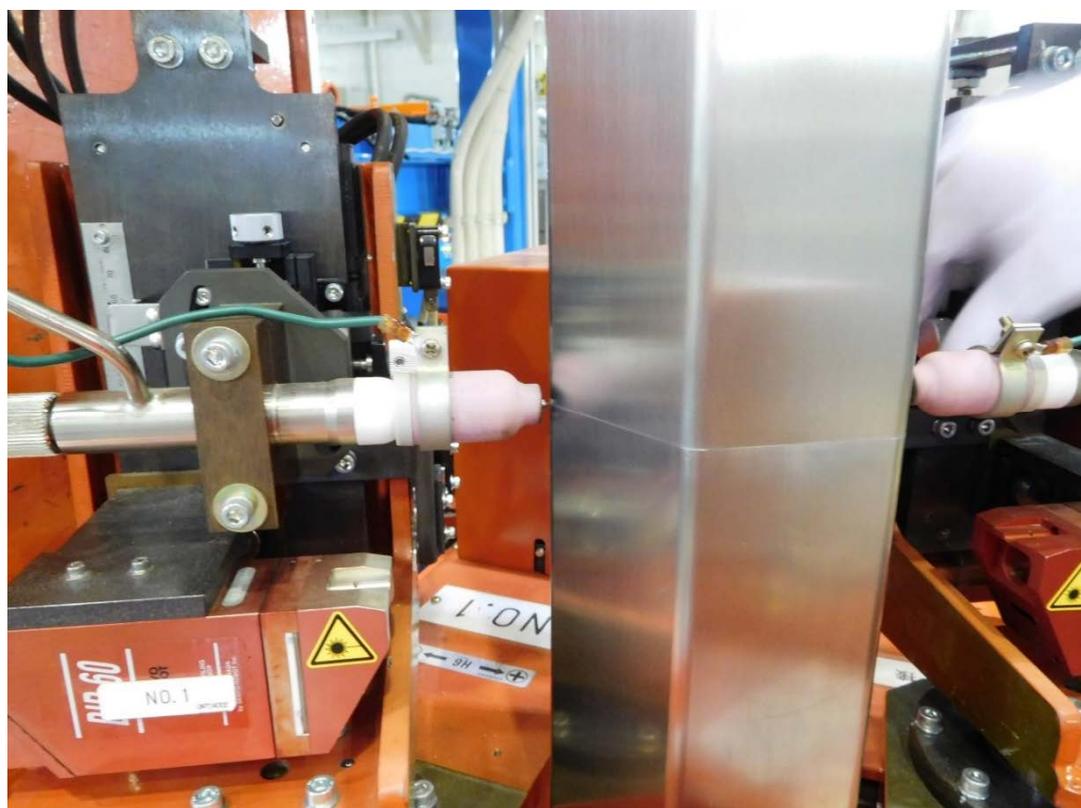


図 57 ラップ管・エントランスノズル溶接の様子 2



図 58 ラップ管・エントランスノズル溶接の様子 3

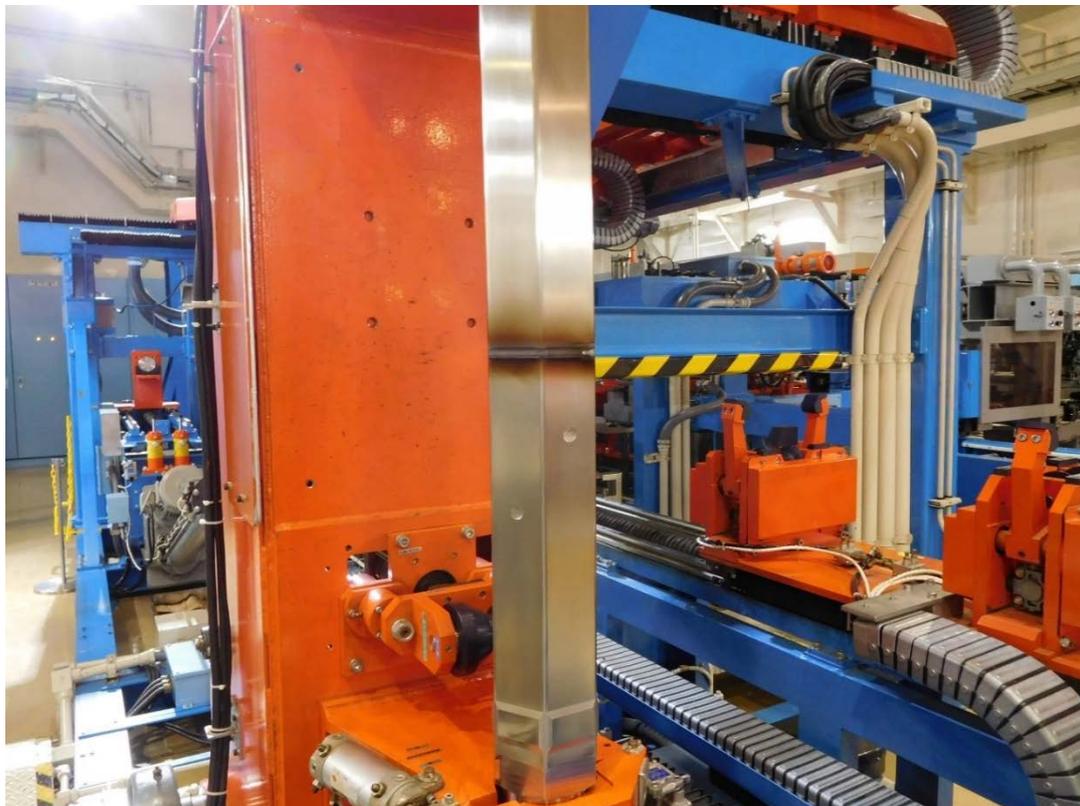


図 59 ラップ管・エントランスノズル溶接の様子 4

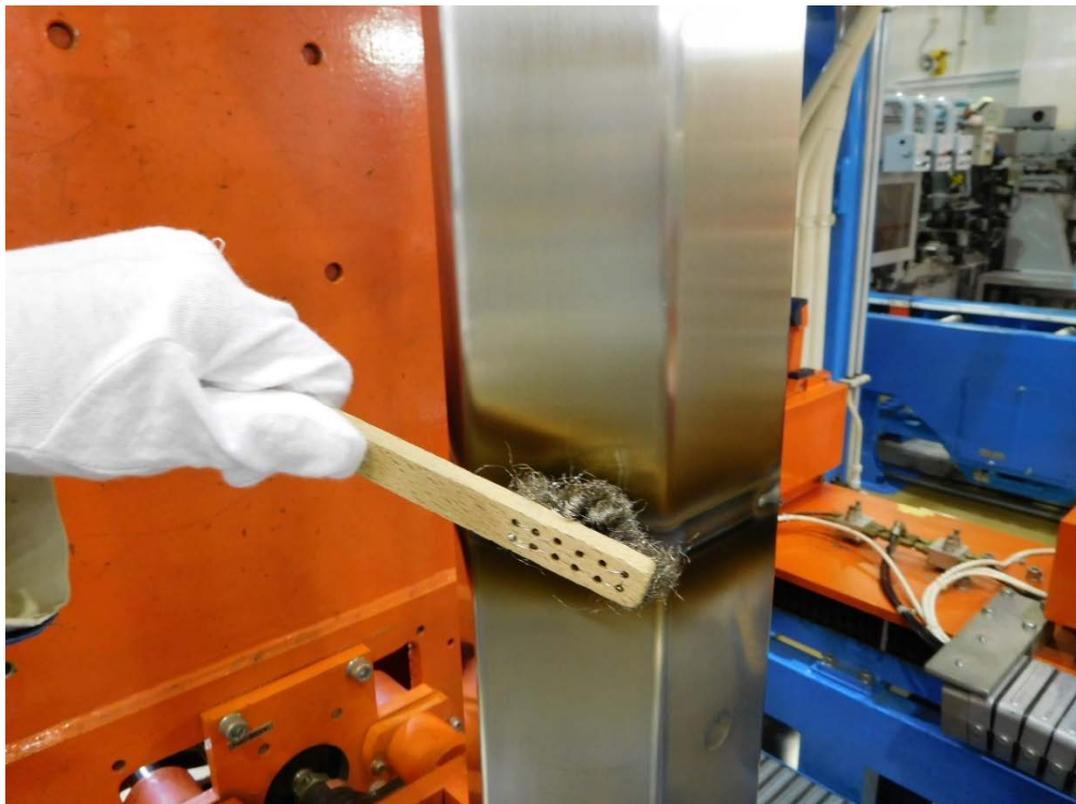


図 60 ラップ管・エントランスノズル溶接の様子 5



図 61 ラップ管・エントランスノズル溶接の様子 6

11. 模擬燃料集合体の一時保管及び貯蔵

組み立ての完了した模擬燃料集合体は、集合体移送クレーン(2)を使用して一時保管ピット内の貯蔵容器内に自動搬送される。模擬燃料集合体の検査は品質管理課が担当し、一時保管ピットから集合体検査設備への搬送及び検査後の戻し搬送までを行う。その後、検査が合格となった模擬燃料集合体を収納した貯蔵容器を集合体移送クレーン(2)、受渡装置及び集合体移送クレーン(3)を用いて、集合体・保管体貯蔵庫に搬送、指定されたピットに貯蔵する(図 62、図 63 参照)。



図 62 模擬燃料集合体の一時保管及び貯蔵の様子 1

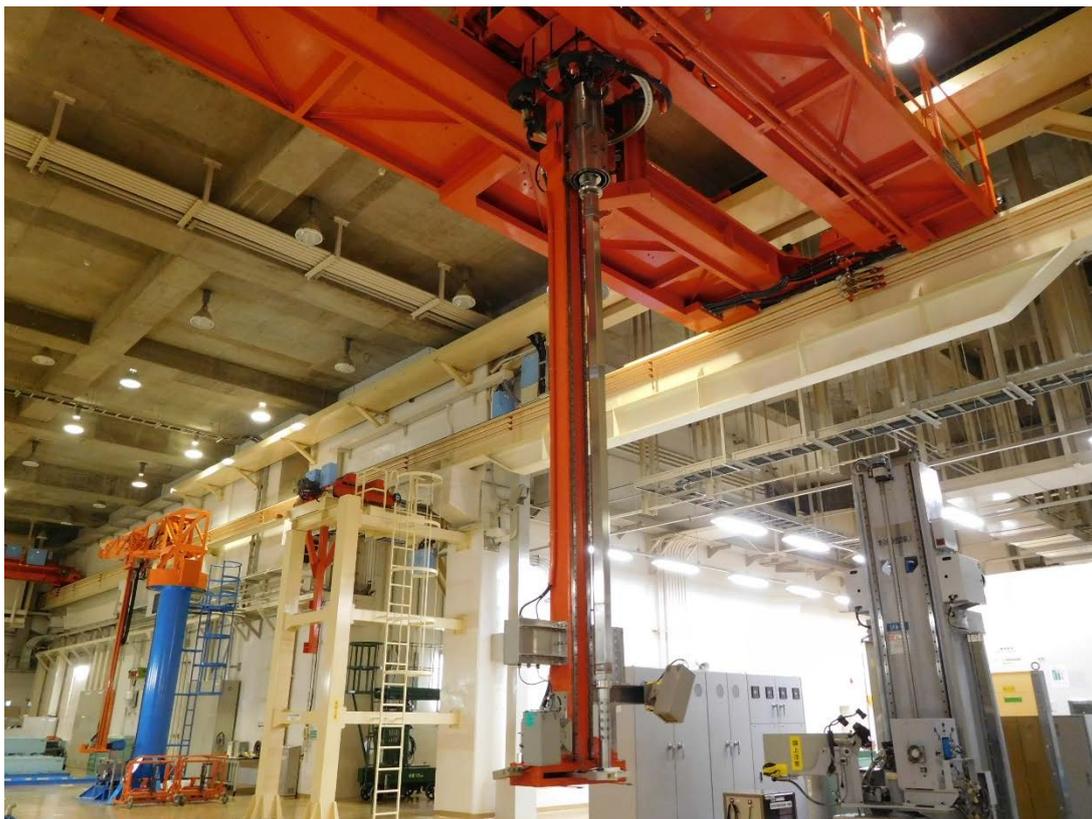


図 63 模擬燃料集合体の一時保管及び貯蔵の様子 2

12. 模擬燃料集合体の外観検査及び寸法検査

模擬燃料集合体は、炉に装荷するため、外観検査、寸法検査を実施した。検査した結果、全数の模擬燃料集合体の合格を確認した。合格基準を以下表 11 に示す。また外観検査、寸法検査の様子を図 64 に示す。

表 11 模擬燃料集合体外観検査、寸法検査合格基準

作業名	検査項目	合格基準
外観検査	○集合体外観	表面に割れ、傷等で有害なものが無く、表面傷は、限界見本以下であること。 傷深さ $\leq 200 \mu\text{m}$
	○刻印の状態	模擬燃料集合体番号正しく刻印されていること。
	○部品構成	部品に欠如がないこと。
寸法検査	○全長	$4200 \pm 5 \text{ mm}$
	○曲り	$\leq 5 \text{ mm/全長}$
	○ねじれ	$\leq 1 \text{ mm}$



図 64 模擬燃料集合体外観検査、寸法検査の様子

13. 模擬燃料集合体の出荷に伴う梱包及びその関連作業

13.1 計測機器等の登録

炉心燃料集合体の場合も同様であるが、燃料製造においては集合体の重量はあくまで参考値である。しかし、出荷に際しては輸送容器に収納した際の重量に制限があるため梱包の際に重量を測定しており、当然ながら重量計（ロードセル）を計測機器に登録し、トレーサビリティを取得した分銅を用いて校正を行う必要がある。本件、模擬燃料集合体についても核燃料物質ではないものの、同様の対応を実施するため、製品 QA に基づく計測機器の管理を実施した。参考として、図 65 に分銅を使用した校正の様子を示す。

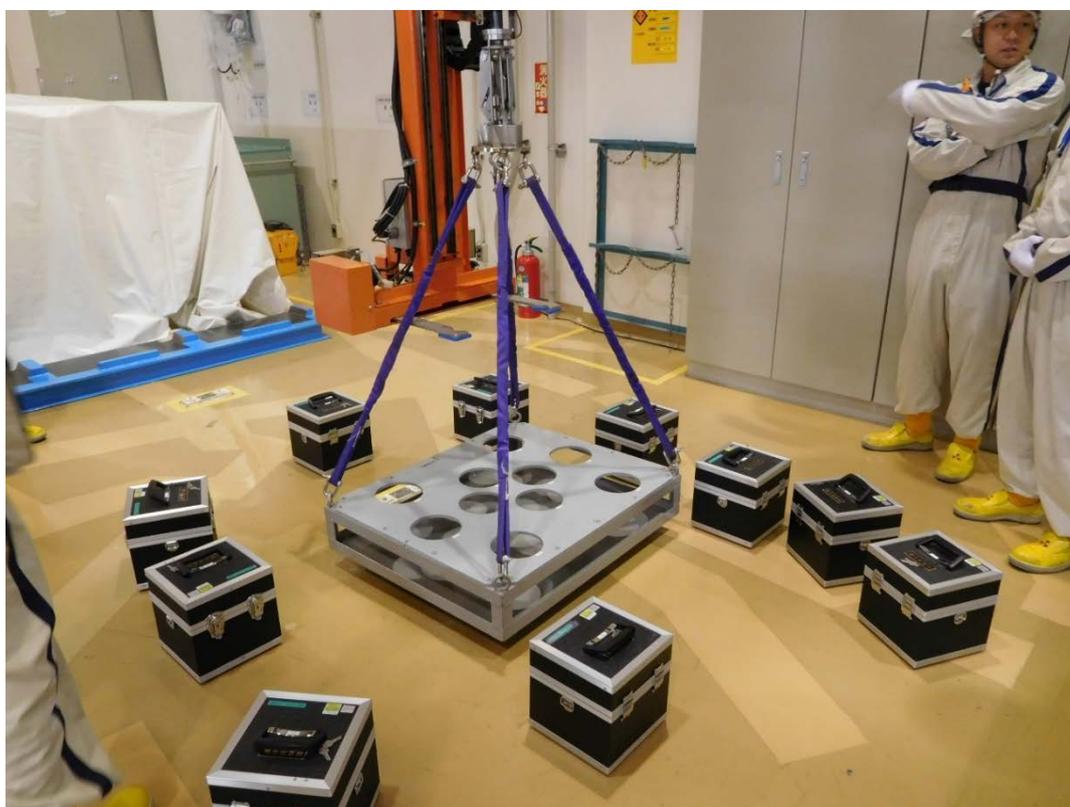


図 65 分銅を使用した校正の様子

13.2 収納容器の受入れ

収納容器は、別途メーカーで並行して製作しているブランケット燃料用模擬集合体の輸送にも使用されることから梱包作業との兼ね合いは、毎回余裕のない場合が多かった。受入れの方法としては、前日もんじゅ側を出発した輸送用トラックが明朝 9:00 前後（場合によっては 13:00 頃）にプルセンターへ到着し、手続き完了後プルトリウム燃料第三開発室ローディングドックへ誘導する。トラックの準備が完了したら搬出入室（2F）のマシンハッチを開放し、天井クレーンを用いて吊上げ、床面に一時仮置きする。トラックからの荷下ろしが全て完了した後、搬出入室（1F）を經由し、組立検査室へ運搬した。なお、組立検査室への運搬完了後は、蓋を開放し、内部のボルト及びナット等に錆等が発生していないかの確認を実施した。これは、第 2 回目出荷のために収納容器を受け入れ、梱包を開始した際、内部のボルト及び締め付け用のナット、蝶ネジ等に錆が発生していた経緯があるため、毎回受入時には確認を実施するようにした（図 66 参照）。



図 66 収納容器内の確認の様子（蝶ネジの錆確認）

13.3 梱包作業

模擬燃料集合体の梱包については金属製の箱に二段、各段に4体ずつの模擬燃料集合体を寝かせた状態で収納する必要があるため、貯蔵容器から取り出した後、垂直に立った状態から横向きに寝かせる必要があった。炉心燃料集合体の梱包では、集合体梱包設備の起こし装置に輸送容器を固定した後、装置を垂直にすることで集合体を垂直状態のまま収納することができた。しかし、今回使用する収納容器は、床置きのみを想定しており、専用の起こし装置受台を設計、製作し、それを使用することで垂直状態の模擬燃料集合体を横向きにし、天井クレーンとナイロンスリングを用いて収納容器内へ収納する手順を採用し、大きなトラブルの発生もなく全ての梱包作業を安全に完遂することができた（図 67～図 74 参照）。

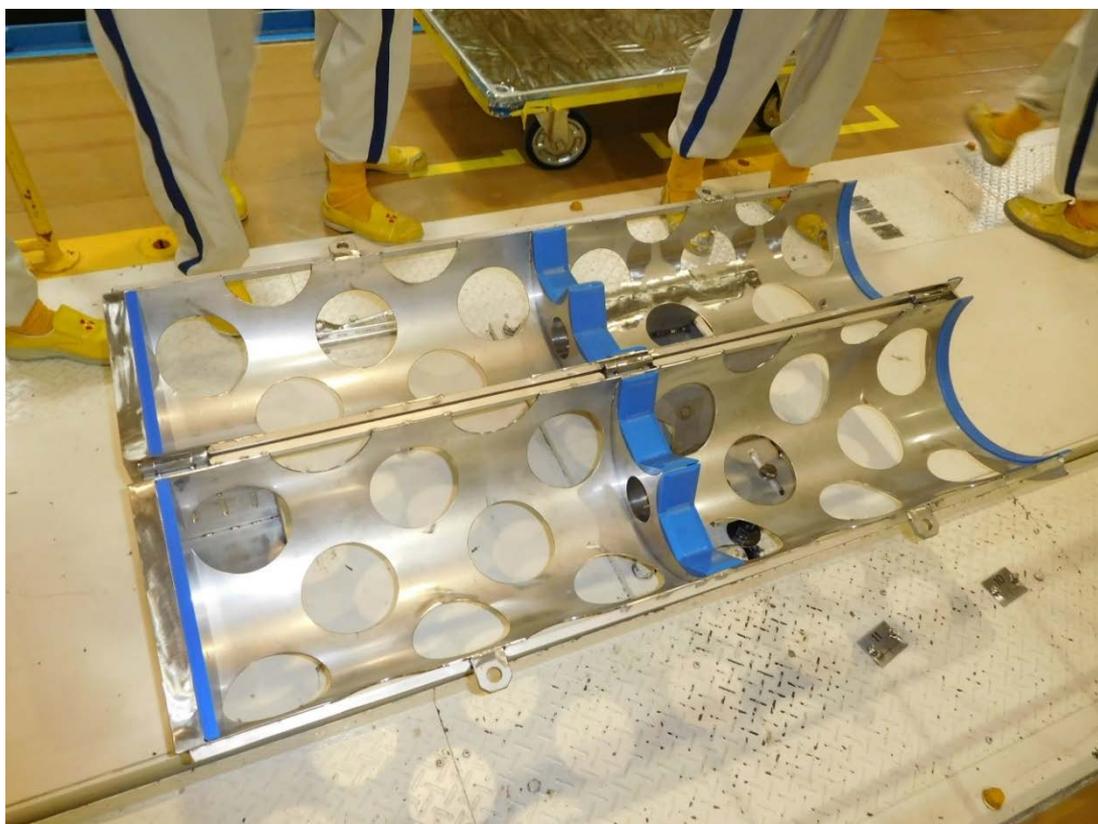


図 67 梱包の様子 1

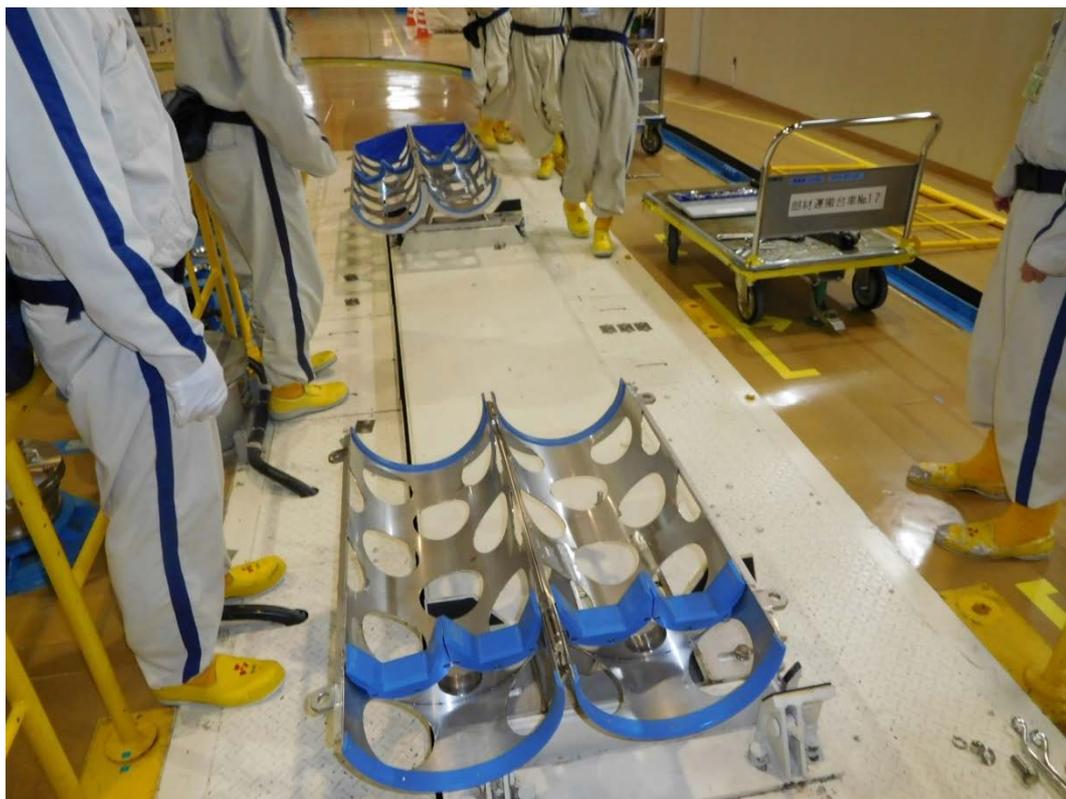


図 68 梱包の様子 2

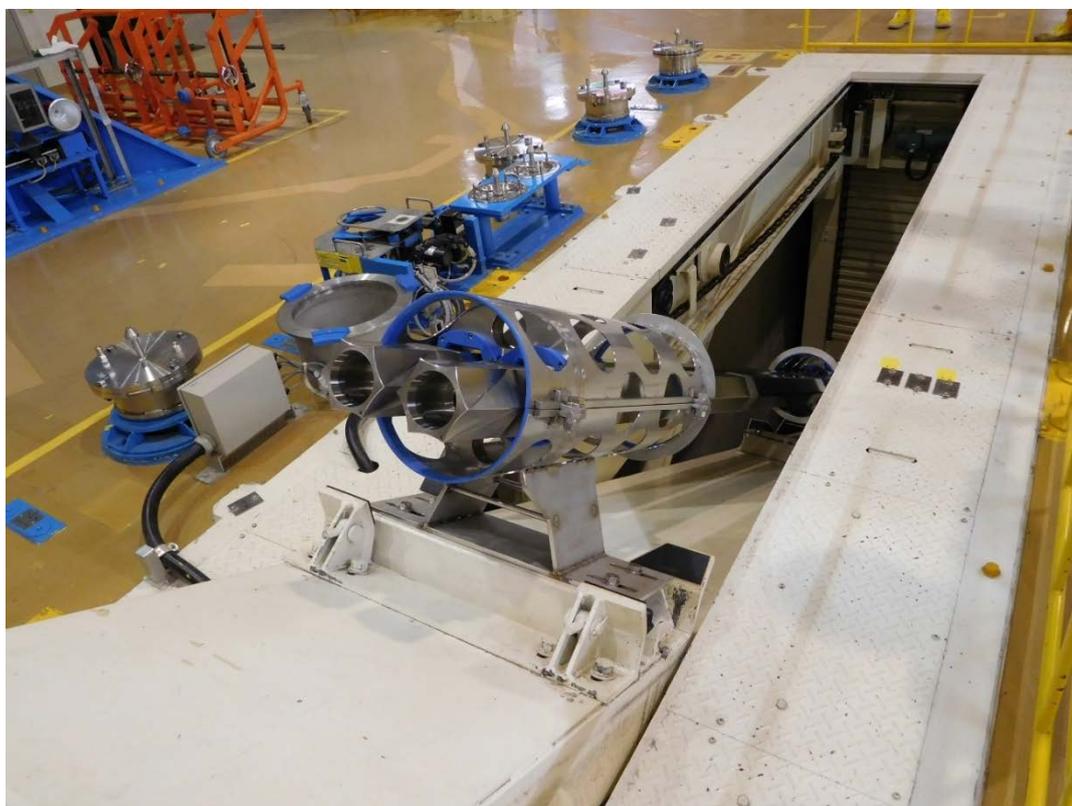


図 69 梱包の様子 3

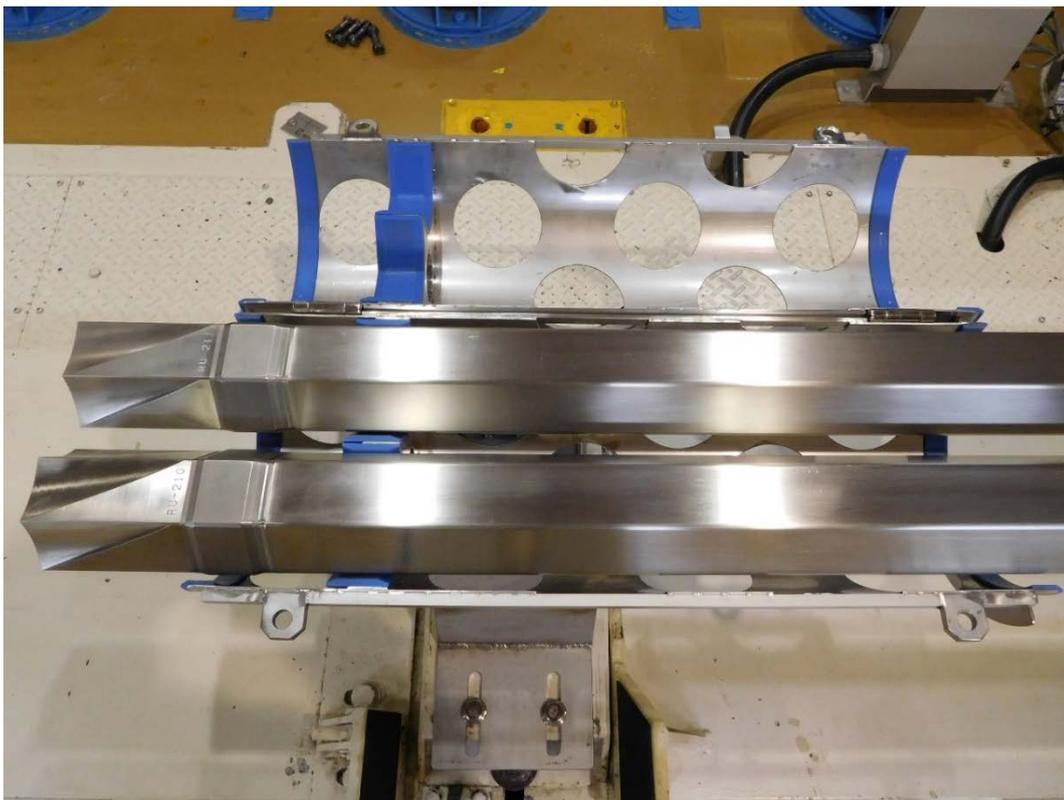


図 70 梱包の様子 4



図 71 梱包の様子 5



図 72 梱包の様子 6



図 73 梱包の様子 7

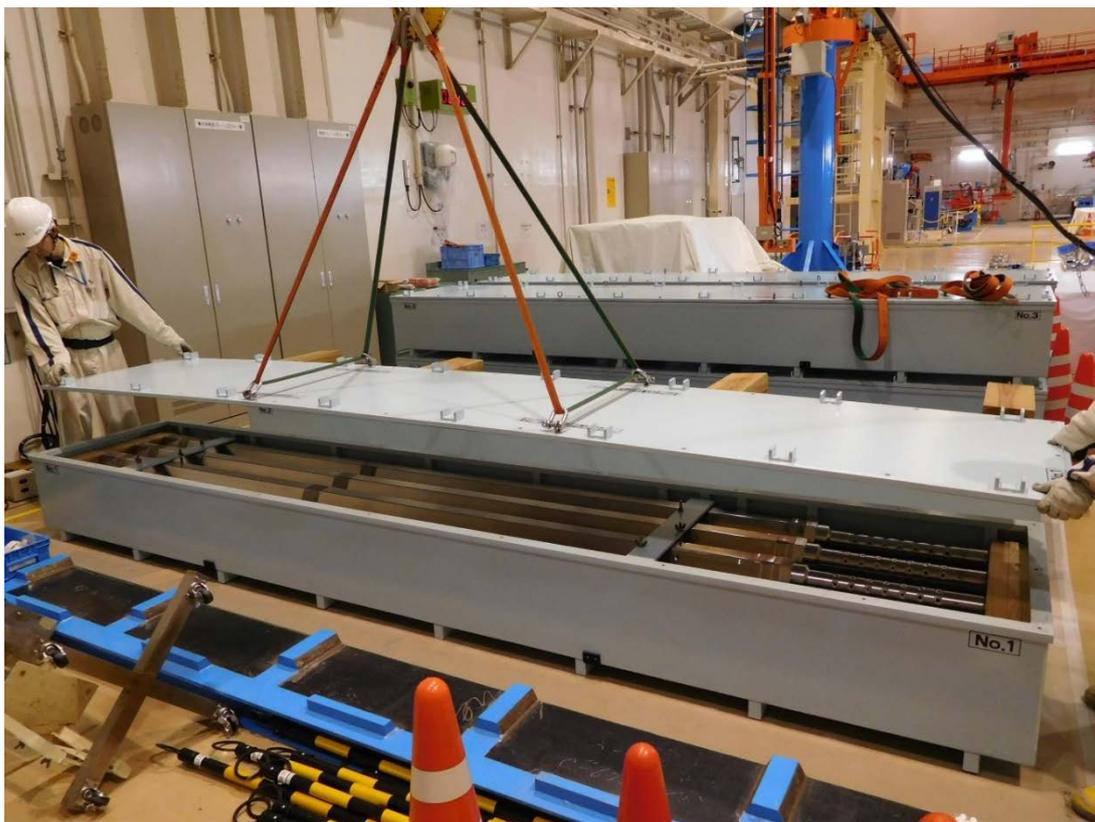


図 74 梱包の様子 8

13.4 模擬燃料集合体を収納した収納容器の出荷

もんじゅ側への出荷日が決定したら、その前日までに梱包の完了した収納容器（最大8体収納）を電動搬送台車で搬出入室（1F）に移動させる。次に搬出入室（2F）の天井クレーンにより吊上げ、所定の床面に一時仮置きする。

出荷日当日は放射線管理第1課が収納容器の汚染検査（持ち出し用）を行い、汚染のないことを確認する。一方、ローディングドックでは運送用のトラックを搬入させた状態でマシンハッチの開放を待つ。双方の準備が整ったところでマシンハッチを開放し、輸送用トラックの荷台に天井クレーンを用いて収納容器を積み込む。なお、トラック荷台への積み込みに関し、最終回のみ収納容器ナンバー毎に場所の指定があったため、それに従い、積み込みを実施した。出荷の様子を図75～図78に示した。



図 75 出荷の様子 1



図 76 出荷の様子 2

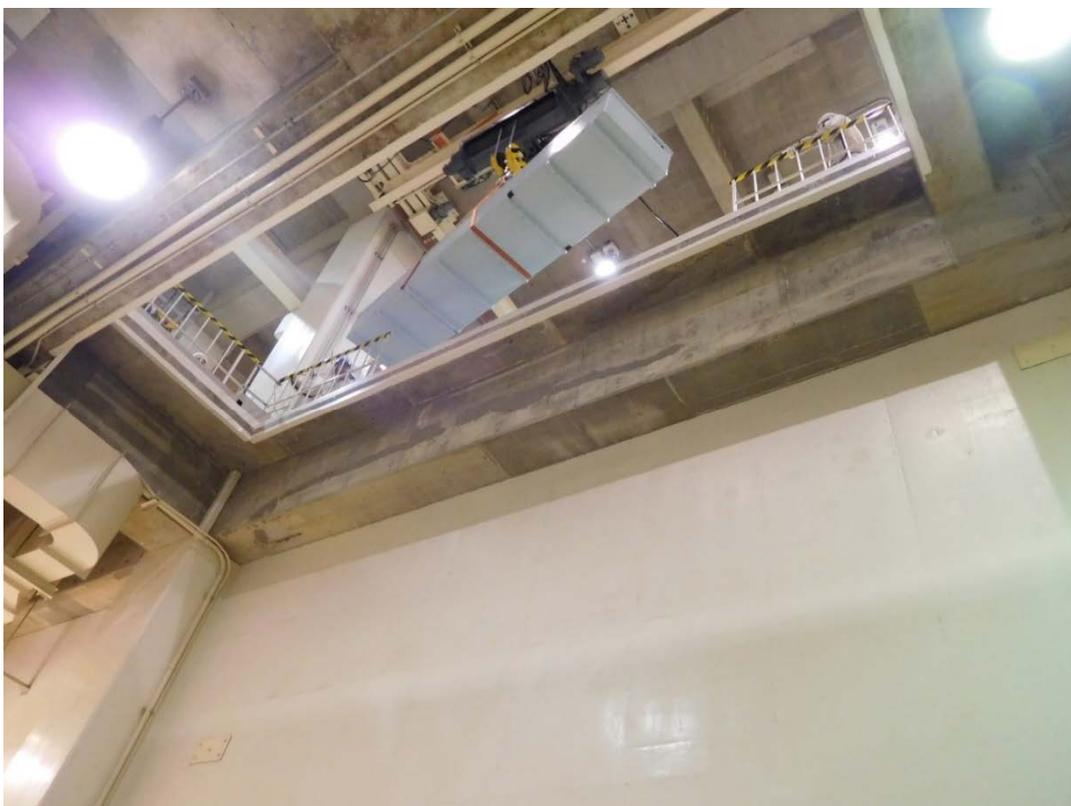


図 77 出荷の様子 3



図 78 出荷の様子 4

14. 製造実績及び出荷実績

14.1 月別製造実績

2018年2月末より開始した模擬燃料集合体の組立作業について、月毎の実績を図79に示した。なお、2019年2月に集合体組立設備（現保管体組立設備）の集合体ベッド起こし装置制御用インバータの不具合によって、同年6月のインバータ本体の更新完了まで組立作業を中断せざるを得なかった。再開後は、残り12体の組立を計画どおりに完遂した。

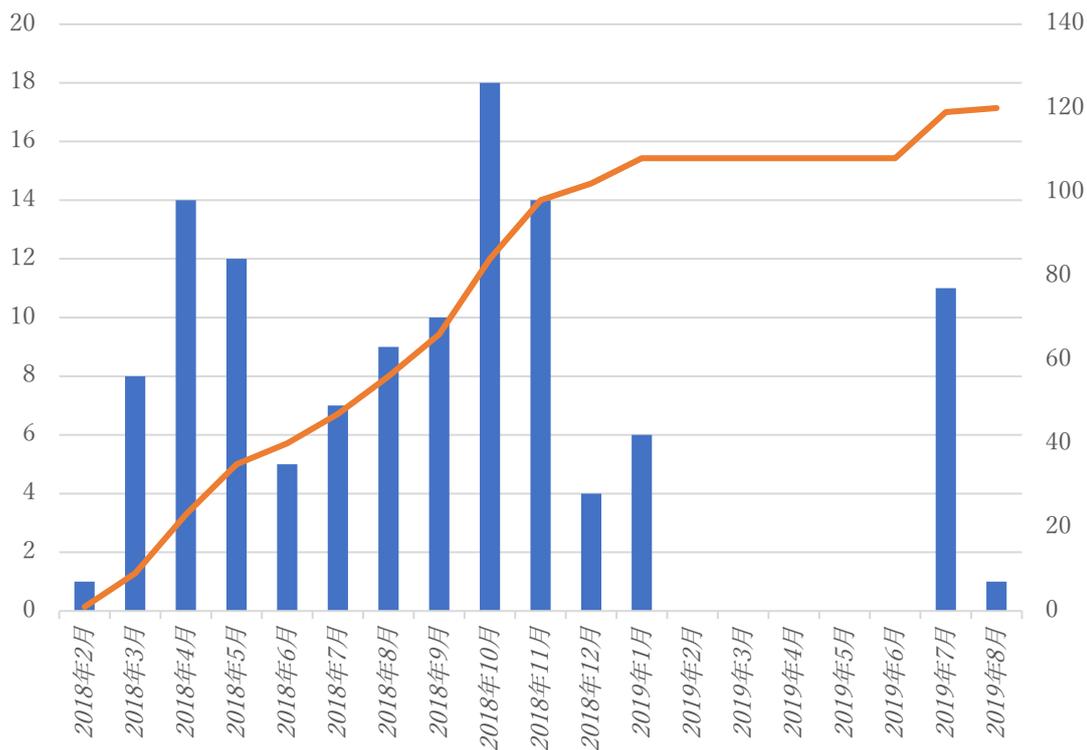


図79 月別組立実績

14.2 出荷実績

2018年5月に最初の出荷を行ってから2020年4月に最後の出荷を完了するまで計5回を炉側の要求に従い、実施した。図80に月毎出荷実績を示す。

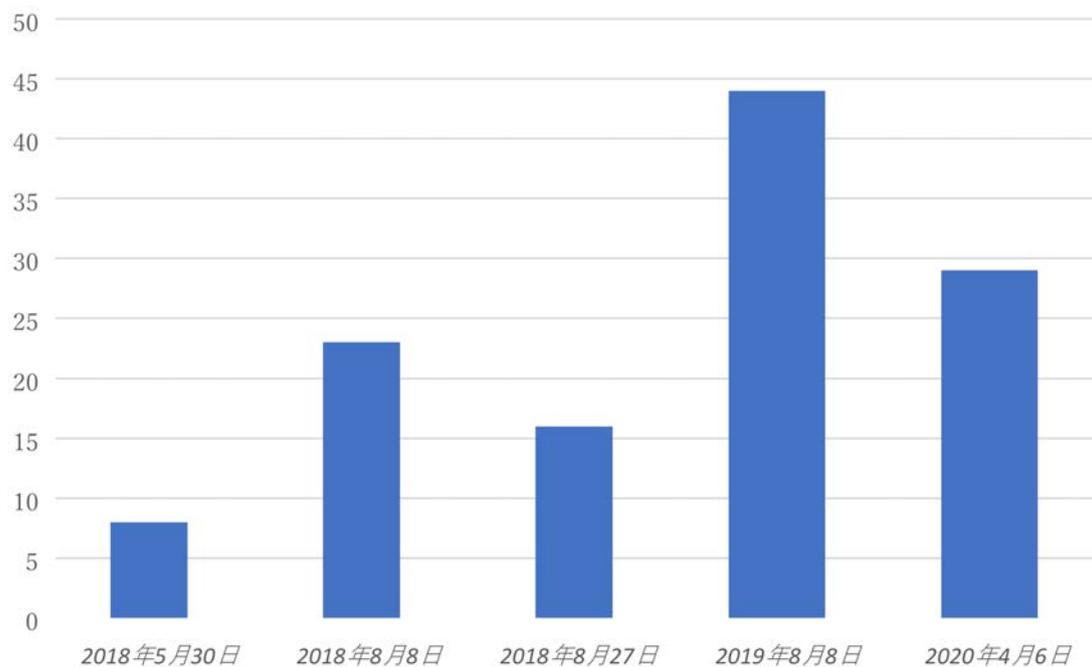


図 80 出荷実績

15. おわりに

模擬燃料集合体の製造における先行試験では若干の不具合が発生したものの、2019年8月に120体を完成させることができた。また、途中、集合体組立設備起こし装置インバータ不具合に見舞われたものの、設備製作メーカーと迅速な対応を協議した。

その際、不具合機種生産中止の影響による後継機への移行のため、その設計等により中断期間はあったものの、無事に予定の体数を製造することができた。これも、試験第2課員の長年の経験が十分に活かされた結果であると考える。

謝辞

模擬燃料集合体製造における、全体の取りまとめをしていただいた計画管理課、模擬燃料集合体の構造等検討・設計をしていただいた設計解析課、部材の調達、検査等をしていただいた品質管理課、保安QA文書の制定、炉側の工程立会等していただいた品質保証課、皆様のご尽力により、無事大きなトラブル等なく120体完成させることができました。厚く御礼申し上げます。

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光路長	メートル	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間には1:1の関係がある。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe≅(10 ³ /4π)A m ⁻¹

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≅」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

