

FBR用低密度MOX燃料ペレットの製造条件確認試験

Confirmation Tests for Fabrication of Low Density MOX Pellet for FBR

村上 龍敏	な 鈴木 紀-	- 畑中 延済	告 塙 幸な	隹 篠崎 雄	村上 真一	飛田 良正
川崎 猛	小林 良仁	飯村 直人	大代 操	助川 宣夫	青野 茂典	伊藤 正徳
	Tatsutoshi /	MURAKAMI, K	Kiichi SUZU	KI, Nobuhiro H	IATANAKA, Yul	kio HANAWA
	Masaru SH	INOZAKI, Shi	nichi MURA	KAMI, Yoshima	asa TOBITA	
	Takeshi KA	WASAKI, Yosh	ihito KOBAY	'ASHI, Naoto II	MURA, Misao	DAIDAI
	Nobuo SU	KEGAWA, Shig	genori AON	D and Masanoi	ri ITO	

東海研究開発センター 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 Tokai Research and Development Center

March 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは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(<u>http://www.jaea.go.jp/index.shtml</u>) より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

JAEA-Technology 2008-017

FBR 用低密度 MOX 燃料ペレットの製造条件確認試験

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター 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

村上 龍敏、鈴木 紀一、畑中 延浩、塙 幸雄、篠崎 雄、村上 真一、飛田 良正 川崎 猛、小林 良仁、飯村 直人、大代 操、助川 宣夫、青野 茂典、伊藤 正徳

(2008年1月16日受理)

「もんじゅ」用低密度 MOX 燃料ペレットについては、平成7年度に実施した「もんじゅ」 一次取替燃料の製造以降、約9年間製造されていない。この間、プルトニウム燃料第三開 発室の主要工程設備の約6割が新設又は更新されるとともに、原料である混合転換粉の Am-241の蓄積が進み、発熱量が増加している。さらに、原料の一つである乾式回収粉末に ついても、設備の更新によりその粉末特性が大きく変化している。

以上を踏まえ、次期「もんじゅ」用低密度 MOX 燃料ペレット製造を円滑に実施するため、 平成 16 年 10 月から平成 18 年 8 月の間、従来に比べ Am-241 が蓄積した原料及び粉末特性 の大きく変化した乾式回収粉を用いて、低密度 MOX ペレットの製造条件確認試験を実施し た。

本報告は、この試験結果をまとめたものである。

試験の結果、従来に比べ Am-241 が蓄積した原料を用いても、製造条件を適切に管理する ことにより、一次取替燃料製造時と同程度の収率で低密度 MOX 燃料ペレットが製造可能で あることを確認した。 JAEA-Technology 2008-017

Confirmation Tests for Fabrication of Low Density MOX Pellet for FBR

Tatsutoshi MURAKAMI, Kiichi SUZUKI, Nobuhiro HATANAKA, Yukio HANAWA Masaru SHINOZAKI, Shinichi MURAKAMI, Yoshimasa TOBITA, Takeshi KAWASAKI Yoshihito KOBAYASHI, Naoto IIMURA, Misao DAIDAI, Nobuo SUKEGAWA Shigenori AONO and Masanori ITO

Fuel Technology Department, Plutonium Fuel Development Center Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories, Tokai Research and Development Center Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 16, 2008)

Low density MOX pellets for FBR "MONJU" have not been fabricated in Plutonium Fuel Fabricating Facility (PFPF) for these 9 years since completion of the first reload fuel for "MONJU" in 1995. In this period, about 60 % of machines in the pellet fabrication process of PFPF have been replaced with new ones, and fabrication of MOX pellets for "JOYO" has been continued using these machines. Concerning the feed MOX powders for "MONJU", the amount of decay heat has been increased with increase of accumulated Am-241 in this period. In addition, powder characteristic of recycled MOX powder which is one of feed powders, MH-MOX powder, UO₂ powder and recycled MOX powder, was significantly changed by replacing former processing machine used for scrap recycling with improved one.

Using MOX powder with increased decay heat and recycled MOX powder processed by new machine, a series of low density MOX pellet fabrication tests were conducted to confirm pellet fabrication conditions for current pellet fabrication machines from October in 2004 to August in 2006. As a conclusion, it was confirmed that low density MOX pellets could be fabricated using these feed powders and replaced machines by adjusting pellet fabrication conditions adequately.

This report summarizes the results of a series of low density MOX pellet fabrication tests.

Keywords: FBR, Low Density MOX Pellet, Recycled Powder, Fuel Fabrication

目次

1. 序論	- 1
 第一期制告条件確認試驗	1
2. 別 別な這不可能的について	1
2.1 mago/m/成 9.9 試験に使用した面料松圭	9
2.2 武殿に使用した床村初本	
	- 2 - 9
2.3.1 基礎訊號 (A1 訊號)	- <u> </u>
2.3.2 乾八凹収衍木の焼宿密度への影響評価試験(A4 試験)	- 3
	- 4
	- 4
2.3.5 連続 立 備 焼 結 ・ 連続 焼 結 設 備 の 性 能 評 価 試 験 (A5 試 験)	- 5
2.4 試験結果	- 6
2.4.1 基礎試験(A1試験)の結果	- 6
2.4.2 乾式回収粉末の影響評価試験(A4 試験)の結果	- 11
2.4.3 造粒・整粒設備試験(A2 試験)の結果	· · 13
2.4.4 ペレット焼結設備の性能評価試験(A3 試験)の結果	- 14
2.4.5 連続予備焼結・連続焼結設備の性能評価試験(A5 試験)の結果	- 17
2.5 考察	- 17
2.5.1 ポアフォーマ添加率と平均焼結密度	- 17
2.5.2 焼結密度のばらつきについて	18
3. 第二期製造条件確認試験	21
3.1 試験概要	- 21
3.2 焼きしまり試験	- 21
3.2.1 試験目的	- 21
3.2.2 試験方法	- 21
3.2.3 試験結果	22
3.3 乾式回収粉末の最適化試験	- 24
3.3.1 試験目的	- 24
3.3.2 乾式回収粉末の準備	24
3.3.3 試験方法	25
3.3.4 試験結果	25
3.3.5 考察	28
3. 4 造粒処理時の粉末温度測定試験	31

JAEA-Technology 2008-017

	3.4.1	試験目的	31
	3.4.2	試験方法	31
	3.4.3	試験結果	32
	3.4.4	処理単位の検討	32
4.	結論		33

訕ഹ		
的 叶		34
参考文	献	34
付録1	各試験での使用設備一覧	83
付録 2	第一期製造条件確認試験で使用した原料粉末の分析物性測定結果一覧	84
付録 3	「もんじゅ」炉心燃料ペレットの主要仕様値	90
付録 4	各試験ランの原料ロット構成と発熱量	91
付録 5	各試験ランの主な試験条件一覧	92
付録 6	焼結ペレットの分析結果一覧	94

Contents

1.	In	trod	uction	1
2.	Pr	rima	ry confirmation tests	1
2	2.1	Cor	nposition of the tests	1
2	2.2	Fee	ed powders used in the tests	2
2	2.3	Obj	ective and method	2
	2.	.3.1	Basic test (A1 test)	2
	2.	.3.2	Influence test of recycled MOX powder (A4 test)	3
	2.	.3.3	Performance test of the granulation equipment (A2 test)	4
	2.	.3.4	Performance test of the sintering furnace (A3 test)	4
	2.	.3.5	Performance test of the continuous de-waxing and sintering furnace	
			(A5 test)	5
2	2.4	Res	sults	6
	2.	4.1	Results of the basic test (A1 test)	6
	2.	4.2	Results of the influence test of recycled MOX powder (A4 test)	11
	2.	4.3	Results of the performance test of the granulation equipment (A2 test)	13
	2.	4.4	Results of the performance test of the sintering equipment (A3 test)	14
	2.	4.5	Results of the performance test of the continuous de-waxing and sintering	
			furnace (A5 test)	17
2	2.5	Dis	cussion	17
	2.	5.1	Relation of addition rate of pore former and average density of sintered	
			pellet	17
	2.	.5.2	Density deviation of sintered pellets	18
3.	Se	econd	lary confirmation tests	21
į	3.1	Ou	tline	21
e e	3.2	Der	nsification test	21
	3.	.2.1	Objective	21
	3.	.2.2	Testing method	21
	3.	.2.3	Results	22
į	3.3	Op	timization test of recycled MOX powder	24
	3.	.3.1	Objective	24
	3.	.3.2	Preparation of recycled MOX powder	24
	3.	.3.3	Testing method	25

	3.3.4	Results	25
	3.3.5	Discussion	28
3	8.4 Ter	nperature measurement of feed powder in granulation process	31
	3.4.1	Objective	31
	3.4.2	Testing method	31
	3.4.3	Results	32
	3.4.4	Consideration of a batch size in granulation process	32
4.	Conclu	ision	33

Acknowledg	ements	- 34
References		- 34
Appendix 1	Tabulated list of machines used in each test	- 83
Appendix 2	Tabulated list of analysis of feed powders used primary confirmation	
	tests	- 84
Appendix 3	Principal specifications of the fuel pellet of "Monju"	- 90
Appendix 4	Composition and calorific power of feed powders in each run	- 91
Appendix 5	Tabulated list of principal conditions in each run	- 92
Appendix 6	Tabulated list of analysis results of sintered pellets in each run	- 94

表リスト

表 2.1	試験概要	35
表 2.2	第一期製造条件確認試験に使用した乾式回収粉末の代表的な粉末物性値	35
表 2.3	各試験ランの最大プルトニウムスポット(A1 試験)	36
表 2.4(a)	各試験ランのポアフォーマ添加率と焼結密度(A1 試験 内側燃料仕様)	36
表 2.4(b)	各試験ランのポアフォーマ添加率と焼結密度(A1 試験 外側燃料仕様)	37
表 2.5	L1CZ0102の脱ガス/再焼結又は再焼結による焼結密度の変化(A1 試験)	37
表 2.6	L1CZ0102の脱ガス/再焼結によるペレット分析値の変化(A1 試験)	38
表 2.7	ばらつき低減対策(A1 試験)	38
表 2.8	ばらつき低減対策を実施した試験ランの主な製造条件と結果(A1試験)	39
表 2.9	各試験ランの造粒処理の結果(A4 試験)	40
表 2.10	各試験ランのグリーンペレットの密度と焼結密度(A2 試験)	41
表 2.11	L1CZ9216の炉別の焼結密度と焼結ペレットの分析値(A3 試験)	41
表 2.12	各試験ランの焼結密度(A3 試験)	41
表 2.13	脱ガス/再焼結による焼結密度の変化(A3 試験)	42
表 2.14(a)	脱ガス/再焼結によるペレット分析値の変化(1)(A3 試験)	42
表 2.14(b)	脱ガス/再焼結によるペレット分析値の変化(2)(A3 試験)	42
表 2.15	各試験ランの焼結密度(A5 試験)	43
表 3.1	焼きしまり試験対象ペレットの製造条件	44
表 3.2	焼きしまり試験の結果・・・・・	44
表 3.3	乾式回収粉末の混合実績	45
表 3.4	乾式回収粉末の処理条件とその物性測定結果(乾式回収粉末の最適化試験)	45
表 3.5	グリーンペレットの製造条件(乾式回収粉末の最適化試験)	45
表 3.6	熱処理条件(乾式回収粉末の最適化試験)	46
表 3.7	造粒処理の結果(乾式回収粉末の最適化試験)	46
表 3.8	各試験ランのグリーンペレットの密度(乾式回収粉末の最適化試験)	47
表 3.9	各試験ランの焼結密度(乾式回収粉末の最適化試験)	47
表 3.10	各試験ランの焼結ペレットの主な分析結果(乾式回収粉末の最適化試験)	48
表 3.11	再焼結2時間後の焼結ペレットの分析結果(乾式回収粉末の最適化試験)	48
表 3.12	粉末温度測定に用いた粉末組成	48

図リスト

図 2.1	第一期製造条件確認試験に用いた乾式回収粉末の種類と比表面積	49
field 2.2	主な試験フローー	50
図 2.3	脱脂・焼結個別処理と脱脂・焼結連続処理の焼結パターンの比較	51
図 2.4	A3 試験の主な試験フロー(脱脂工程以降)	51
oxtimes 2.5	ポアフォーマ添加率と平均焼結密度(A1 試験)	52
oxtimes 2.6	L1CZ0101 の金相写真(A1 試験)	53
oxtimes 2.7	L1CZ0108 の金相写真(A1 試験)	54
oxtimes 2.8	L1CZ0208 の金相写真(A1 試験)	55
図 2.9	結晶粒径と蒸発性不純物(A1 試験)	56
図 2.10	ポアフォーマ添加率と蒸発性不純物(A1 試験)	56
図 2.11	脱ガス/再焼結又は再焼結による平均焼結密度の変化(A1 試験)	57
⊠ 2.12(a)	脱ガス/再焼結(1回目)によるペレットごとの焼結密度の変化(A1 試験)	57
図 2.12(b)	脱ガス/再焼結(2回目)によるペレットごとの焼結密度の変化(A1 試験)	58
図 2.13	グリーンペレットの密度の標準偏差と焼結密度の標準偏差(A1 試験)	58
図 2.14	添加剤混合 I 工程から造粒工程の処理の概要	59
$\boxtimes 2.15$	ポアフォーマ添加率とグリーンペレットの密度の標準偏差(A1試験)	59
図 2.16(a)	乾式回収粉末混合率とグリーンペレットの密度(A4試験,内側燃料仕様)	60
図 2.16(b)	乾式回収粉末混合率とグリーンペレットの密度(A4 試験,外側燃料仕様)	60
図 2.17(a)	乾式回収粉末混合率と焼結密度(A4 試験,内側燃料仕様)	61
図 2.17(b)	乾式回収粉末混合率と焼結密度(A4 試験,外側燃料仕様)	61
図 2.18	ポアフォーマ添加率と平均焼結密度(A1 試験と A4 試験の統合)	62
図 2.19	パス毎の良品収率(混合・造粒設備と造粒・整粒設備の比較)	62
図 2.20	造粒・整粒設備のアンダー品の流れ	63
図 2.21	A2 試験の焼結ペレットの金相写真(L1CZ0210)	64
$fieldsymbol{\mathbb{Z}}$ 2.22	焼結炉ごとの平均焼結密度(A3 試験)	64
図 2.23(a)	グリーンペレットの通常の整列手順	65
図 2.23(b)	L1CZ0217 のグリーンペレットの整列手順	65
図 2.24(a)	脱ガス/再焼結による平均焼結密度の変化(A3 試験)	66
図 2.24(b)	脱ガス/再焼結による焼結密度の標準偏差の変化(A3 試験)	66
oxtimes 2.25	ペレットのポアフォーマ含有率と焼結密度の関係模式図	67
図 2.26(a)	初焼結後の密度抜取測定結果(L1CZ0102)	68
図 2.26(b)	再焼結後の密度抜取測定結果(L1CZ0102)	68
oxtimes 2.27	焼結時間と焼結密度の関係概略図	69
図 2.28	焼結時間と焼結密度のばらつきの関係概略図	69
図 2.29	低密度ペレット製造に適した乾式回収粉末のイメージ	70

図 3.1	焼きしまり試験の結果(焼結密度)	71
図 3.2	焼きしまり試験の結果(平均結晶粒径)	71
図 3.3	L1CZ0208 の気孔分布の変化(焼きしまり試験)	72
図 3.4	L1CZ0208の直径4µm以下の気孔数割合の変化(焼きしまり試験)	72
図 3.5	乾式回収粉末の SEM 写真(乾式回収粉末の最適化試験)	73
図 3.6	乾式回収粉末の最適化試験の試験フロー・・・・・	74
図 3.7	ポアフォーマ添加率と焼結密度の標準偏差	
	(A1 試験と乾式回収粉末の最適化試験)	75
図 3.8(a)	再焼結による焼結密度の変化(乾式回収粉末の最適化試験ラン1)	76
図 3.8(b)	再焼結による焼結密度の変化(乾式回収粉末の最適化試験ラン2)	76
図 3.9	ポアフォーマ無添加の焼結ペレットの金相写真	
	(乾式回収粉末の最適化試験)	77
図 3.10	焼結ペレットの気孔分布(乾式回収粉末の最適化試験ポアフォーマ無添加)・	78
図 3.11	乾式回収粉末による密度低下の模式図	78
図 3.12	焼結ペレットの金相写真(乾式回収粉末の最適化試験ラン 1, 容器 D)	79
図 3.13	ポアフォーマ添加率と平均焼結密度	
	(第一期製造条件確認試験と乾式回収粉末の最適化試験)	80
図 3.14	乾式回収粉末の混合率と焼きしまりの関係模式図	80
図 3.15	ラン1の焼結時間を4時間とした場合のポアフォーマ添加率と	
	焼きしまりの検討(乾式回収粉末の最適化試験)	81
図 3.16	平均焼結密度と焼結密度の標準偏差	
	(第一期製造条件確認試験と乾式回収粉末の最適化試験)	81
図 3.17	混合造粒設備のホッパ形状	82
図 3.18	ホッパ内粉末温度の時間変化	82

This is a blank page.

1. 序論

プルトニウム燃料第三開発室では、高速炉用 MOX 燃料製造技術開発を行うとともに、高 速実験炉「常陽」及び高速増殖炉「もんじゅ」用 MOX 燃料製造を通してその実証を行って いる。燃料仕様から両燃料を見た場合、「常陽」用燃料が高密度 MOX 燃料ペレットを用いて いるのに対し、「もんじゅ」燃料には、高燃焼度を達成するため低密度 MOX 燃料ペレットが 採用されている点に大きな違いがある。低密度 MOX 燃料ペレットの製造は、燃料製造過程 でポアフォーマ (密度降下剤) と呼ばれる有機化合物を多量に添加する必要があるため、 焼結ペレットの密度のばらつきが大きくなるという製造上の難しさがあるが、低密度 MOX 燃料ペレットの製造は、平成 7 年度に実施した「もんじゅ」一次取替燃料製造以降、約 9 年間、行なわれていない。この間、プルトニウム燃料第三開発室の主要工程設備の約 6 割 が新設又は更新されるとともに、原料である混合転換粉の Am-241 の蓄積が進み、発熱量も 増加している。さらに、原料の一つである乾式回収粉末についても、その製造に用いてい る粗粉砕・粉砕設備を更新したため、粉末特性が大きく変化している。

このような状況を踏まえ、今後、「もんじゅ」用低密度 MOX 燃料ペレットの製造を円滑に 進めるため、従来に比べ Am-241 が蓄積した原料及び粉末特性の大きく変化した乾式回収粉 を用いて燃料製造試験を実施し、適切に製造条件を管理することで従来と同等以上の製造 収率を確保できるかを確認した。試験では、燃料製造時のロットサイズである 38kgMOX を 一つの試験単位(試験ラン)として行った。

第一期製造条件確認試験は、平成16年10月に秤量を開始し、平成18年3月、30ランの ペレット製造試験を終了した。その後、原料粉末の崩壊熱による造粒工程への影響、焼結 ペレットの焼きしまり特性及び乾式回収粉末の特性について更なる知見を深めるべく、引 き続き第二期製造条件確認試験を実施した。第二期製造条件確認試験は、2ランの追加燃料 製造試験、第一期製造条件確認試験で得られた焼結ペレットを用いた焼きしまり試験等を 実施し、平成18年8月に終了した。本報告は、これらの試験結果をまとめたものである。

2. 第一期製造条件確認試験

2.1 試験の構成

第一期製造条件確認試験は、A1 試験から A5 試験の5種の試験から構成される。各試験の 概要を表 2.1 に示す。

プルトニウム燃料第三開発室のペレット工程設備は、以下の三種類の設備に大別できる。

- 低密度 MOX 燃料ペレット及び高密度 MOX 燃料ペレット製造の何れにも供したことの ある設備
- 高密度 MOX 燃料ペレット製造にのみ供したことのある設備
- 低密度 MOX 燃料ペレット及び高密度 MOX 燃料ペレット製造の何れにも供したことの

ない新設、或は更新された設備(以下、「新規設備」という。)

このため、まず、基礎試験(A1 試験)で高密度 MOX 燃料ペレット製造又は低密度 MOX 燃料ペレット製造に供用したことのある設備を用いて燃料製造試験を実施し、ポアフォーマの添加率などの製造条件の把握を行うとともに、これら設備の低密度 MOX 燃料ペレットの 製造への適用性を確認した。

その後、A4 試験として、平成9年に更新した粗粉砕・粉砕設備で製造した乾式回収粉末 を用いて、その混合率を変化させながら燃料製造試験を行い、乾式回収粉末が焼結ペレッ トの密度等に与える影響を評価する試験を実施した。乾式回収粉末とは、燃料製造過程で 発生したスクラップペレットを粉砕したリサイクル粉末である。

さらに、3 つの新規設備の性能等を確認するため、A1 試験で用いた設備をベースに一部 新規設備を用いた燃料製造試験(A2, A3, A5 試験)を実施した。A2 試験の試験対象設備は、 造粒・整粒設備、A3 試験はペレット焼結設備、A5 試験は連続予備焼結・焼結設備である。 各試験に使用した設備の一覧は、付録1のとおりである。

2.2 試験に使用した原料粉末

第一期製造条件確認試験に使用した原料粉末の分析結果を付録2に示す。

乾式回収粉末は、燃料製造過程で発生したスクラップペレットをロールクラッシャで粗 粉砕した後、ジェットミルで粉砕して得られる。上述のとおり、乾式回収粉末を製造する 粗粉砕・粉砕設備は、平成9年に更新された。第一期製造条件確認試験では、この更新さ れた新粗粉砕・粉砕設備で製造された乾式回収粉末(以下、「新乾回粉」という。)と、更 新前の旧粗粉砕・粉砕設備で製造された乾式回収粉末(以下、「旧乾回粉」という。)を用 いた。表2.2に試験に用いた代表的な新乾回粉と旧乾回粉の主な物性値を示す。又、図2.1 に旧乾回粉と新乾回粉の比表面積を示す。この図から分かるとおり、新乾回粉は旧乾回粉 に比べ比表面積が大きいという特徴を有している。

2.3 試験目的と試験方法

2.3.1 基礎試験(A1試験)

2.3.1.1 試験目的

プルトニウム燃料第三開発室のペレット製造工程設備は、平成7年度の「もんじゅ」第 一次取替用 MOX 燃料ペレットの製造以降、その約6割が新設・更新された。このうち大半 の設備は、「もんじゅ」第一次取替用燃料の製造後に行われた「常陽」用の MOX 燃料ペレッ トの製造(Mk-III 初装荷,同第一次取替)に用いられており、高密度 MOX 燃料ペレットの製 造に使用できることが確認されている。しかし、低密度 MOX 燃料ペレット製造では、MOX 粉 末に多量のポアフォーマを添加するため、低密度 MOX 燃料ペレット製造特有の管理条件を 別途、設定しなければならない可能性もある。 従って、本試験では、高密度 MOX 燃料ペレット又は低密度 MOX 燃料ペレットの製造の何れ かに供用したことのある設備を用いて試験を実施し、これら設備の低密度 MOX 燃料ペレッ トの製造への適用性を確認するとともに、ポアフォーマ添加率などの製造条件の把握と選 定を行い、これ以降に実施する試験の基準条件を設定する。

2.3.1.2 試験方法

基礎試験では 16 ランの燃料製造試験を実施した。L1CZ0101 から L1CZ0108 までの 8 ラン は「もんじゅ」内側炉心 MOX 燃料ペレット仕様、L1CZ0201 から L1CZ0208 までの 8 ランは「も んじゅ」外側炉心 MOX 燃料ペレット仕様とした。「もんじゅ」 炉心 MOX 燃料ペレットの仕様 を付録 3 に示す。

内側燃料仕様の8ランのうち、最初の3ラン(L1CZ0101-L1CZ0103)では、焼結ペレットの密度(以下、「焼結密度」という。)の平均値が仕様の中心(85%TD)となるような製造条件を選定し、その後の5ラン(L1CZ0104-L1CZ0108)で焼結密度のばらつき低減方法について検討した。

外側燃料仕様の8ラン(L1CZ0201-L1CZ0208)では、ポアフォーマ添加率4水準、繰り返 し回数2回でペレット製造を行い、ポアフォーマ添加率がペレット製造工程設備の運転条 件や製造されるペレット品質へ与える影響について検討した。

図 2.2 に主な試験フローを示す。又、付録 4 及び付録 5 に、試験ランの原料構成及び主 な試験条件をそれぞれ示す。

なお、均一化混合条件の混合時間は、当初、内側仕様、外側仕様ともに 5 時間としてい たが、内側仕様での試験中にプルトニウムスポットが発生したため、外側仕様での試験で は8時間に変更した。

2.3.2 乾式回収粉末の焼結密度への影響評価試験(A4 試験)

2.3.2.1 試験目的

新乾回粉は高密度 MOX 燃料ペレットの製造で使用した実績があり、旧乾回粉に比べ焼結が 進みやすく、同一の割合で乾式回収粉末を混合した場合、新乾回粉を用いた方が、焼結密 度が高くなる傾向がある。又、旧乾回粉の場合、乾式回収粉末がポアフォーマ(密度降下 剤)の役割を持ち、乾式回収粉末の混合率が高くなるに従い焼結密度が低下する傾向が得 られているが、新乾回粉での試験実績はなく、十分なデータが得られていない。さらに、 低密度 MOX 燃料ペレット製造では高密度 MOX 燃料ペレット製造に比べ製造収率が安定しに くく、スクラップペレットの発生量が変動するため、乾式回収粉末の混合率を変えながら MOX 燃料ペレットの製造を行う必要が生じる。

以上を踏まえ、本試験では、乾式回収粉末の混合率を変化させてペレット製造試験を行い、 焼結密度等について評価した。 2.3.2.2 試験方法

乾式回収粉末の混合率を変えて、5 ランの MOX 燃料ペレット製造試験を行った。5 ランの 内訳は、内側燃料仕様で乾式回収粉末の混合率を 5wt%及び 40wt%とした 2 ラン、外側燃料 仕様で 5wt%、15wt%及び 40wt%とした 3 ランである。又、乾式回収粉末の混合率 25wt%の試 験結果として、A1 試験で実施した試験ラン L1CZ0108、L1CZ0206 及び L1CZ0208 の試験結果 も検討に用いた。

ペレットの製造フローは、A1 試験と同様である(図 2.2 参照)。試験条件は、A1 試験で 選定した平均焼結密度が 85%TD となる条件とした。付録 4 及び付録 5 に、試験ランの原料 構成及び主な試験条件をそれぞれ示す。

2.3.3 造粒·整粒設備性能確認試験(A2 試験)

2.3.3.1 試験目的

プルトニウム燃料第三開発室ペレット製造工程の造粒・整粒設備は、添加剤(バインダ 及びポアフォーマ)の熱劣化対策のため、平成12年に粉末ホッパに冷却装置を取り付ける 改造が行われた。その後、当該設備は「常陽」MOX 燃料ペレット製造に用いられ、燃料製造 に使用できることが確認された。しかし、低密度 MOX 燃料ペレットの製造では多量のポア フォーマを添加するため、低密度ペレット燃料製造特有の管理条件を設定しなければなら ない可能性もある。

このため、本試験では、本格燃料製造キャンペーンに使用する前に造粒・整粒設備の機 能及び性能等の確認を行い、低密度 MOX 燃料ペレットの製造に供することができるかを確 認する。

2.3.3.2 試験方法

本試験では、造粒工程で造粒・整粒設備を使用して 2 ラン(L1CZ0209、L1CZ0210)の「も んじゅ」外側炉心燃料仕様のペレット製造を行い、造粒・整粒設備の性能等を確認した。 造粒工程以外では、A1 試験で使用した設備を用いた。試験フローは、A1 試験と同様である (図 2.2 参照)。試験条件は、A1 試験で選定した平均焼結密度が 85%TD となる条件とした。

付録4及び付録5に、試験ランの原料構成及び主な試験条件をそれぞれ示す。

2.3.4 ペレット焼結設備の性能評価試験(A3 試験)

2.3.4.1 試験目的

本試験の試験対象としたペレット焼結設備は、平成 15 年にプルトニウム燃料第三開発室 ペレット製造工程に新規に導入された。本設備は、従来、予備焼結設備で脱脂、焼結設備 で焼結と行なっていた処理を 1 設備で連続処理できる機能を持ち、従来よりも短時間で焼 結処理できる。脱脂及び焼結の個別処理(従来熱処理方法)と連続処理(新熱処理方法)の 昇温パターンを図 2.3 に示す。 本試験では、本格燃料製造キャンペーンに使用する前にペレット焼結設備の機能及び性能 等の確認を行うとともに、脱脂及び焼結の連続処理が燃料品質に与える影響を確認し、低 密度 MOX 燃料ペレット製造に供することができるかを確認する。

2.3.4.2 試験方法

ペレット焼結設備は既設のバッチ式焼結設備と同様に 4 つの炉から構成されるため、ま ず、各炉の焼結性能が同等であることを試験した。各炉の焼結性能の評価は、それぞれの 炉でグリーンペレットを焼結し、各焼結密度を比較することで行った。試験に用いたグリ ーンペレットは、ポアフォーマの偏在による焼結密度のばらつきの影響が入らないように、 ポアフォーマを無添加として製造したものを用いた(L1CZ9216)。

次に、5ランの低密度ペレットの焼結試験を実施し、前半の4ラン(L1CZ0211, 212, 216, 217) で脱脂・焼結・脱ガス工程の設備として基本的な性能を備えていることを試験した上で、 残り1 ラン(L1CZ0218)で新工法(脱脂・焼結連続処理)の試験を行った。ペレット焼結試 験に用いたグリーンペレットは、「もんじゅ」外側炉心燃料仕様とし、A1 試験で使用した工 程設備を用いて製造した。成型工程までのフローは、A1 試験と同様である(図 2.2 参照)。 各ランの脱脂工程以降の試験フローを図 2.4 に示す。グリーンペレットの製造条件は、A1 試験で選定した平均焼結密度が 85%TD となる条件とした。付録4及び付録5に、試験ラン の原料構成及び主な試験条件をそれぞれ示す。

2.3.5 連続予備焼結・連続焼結設備の性能評価試験(A5 試験)

2.3.5.1 試験目的

連続予備焼結・連続焼結設備は、平成17年にプルトニウム燃料第三開発室のペレット製造工程に新設された。本設備は連続予備焼結炉と連続焼結炉から構成される。グリーンペレットを載せた焼結皿は、6枚毎に台板(スキッド)に積載され、これがトンネル型の炉内を連続的に移動することでペレットが熱処理される構造である。すなわち、既設のバッチ式焼結設備が4つの焼結炉で処理を行うのに対し、本設備では1つの焼結炉で連続的に処理する。

本試験では、本格燃料製造キャンペーンに使用する前に、連続予備焼結・連続焼結設備の 機能及び性能等の確認を行い、MOX 燃料ペレット製造に供することができるかを確認する。

2.3.5.2 試験方法

本試験では、熱処理時間(プッシャー速度)を変えてペレットの焼結試験を実施し、連続 予備焼結設備・連続焼結設備が脱脂・焼結工程の設備として基本的な性能を備えているこ とを確認した。

本試験で使用したグリーンペレットは、「もんじゅ」外側炉心 MOX 燃料ペレット仕様とし、 A1 試験で使用した工程設備を用いて製造された。試験フローは、A1 試験と同様である(図 2.2 参照)。グリーンペレットの製造条件は、A1 試験で選定した平均焼結密度が 85%TD となる条件とした。付録 4 及び付録 5 に、試験ランの原料構成及び主な試験条件をそれぞれ示す。

2.4 試験結果

各試験の結果は、以下の通りである。

2.4.1 基礎試験(A1試験)の結果

A1 試験の結果を以下に示す。

2.4.1.1 設備性能

内側燃料仕様及び外側燃料仕様の試験ランをそれぞれ8ラン処理した結果、「常陽」燃料 製造と比較して、特段処理能力が劣る設備は見られなかった。プルトニウムスポット以外 の項目について燃料仕様を十分満足する結果となり、この結果から均一化混合設備を除く 設備については、製品品質の観点からも問題ないことが確認できた(付録6参照)。均一化 混合設備は、プルトニウムスポットの発生と深く係る設備であるため、以下のとおり問題 点を検討した。

表2.3に均一化混合時間と製造したペレットのプルトニウムスポットの測定結果を示す。 内側燃料仕様の試験ランでは、「もんじゅ」第一次取替燃料製造時の混合条件を踏まえ混合 時間を5時間としたが、仕様を超えるプルトニウムスポットが観察され、その濃度もプル トニウム原料の濃度に近いものであった。本設備は、「もんじゅ」第一次取替燃料製造で使 用実績のある設備であるが、設備の老朽化に伴い当時には発生していなかったボールミル ポットの粉末投入口(粉末取出口も兼ねる。)からの粉末漏れが発生していた。このため、 混合初期に当該箇所から漏れ出し付着した混合不足の粉末が、混合後の粉末を取り出す際 に十分に混合された粉末に混入し、プルトニウムスポットとなったと予想された。

そこで外側燃料仕様の試験ランのうち、前半の4 ラン(試験ラン No. L1CZ0201-L1CZ0204) では、5 時間の混合後に一旦ボールミルから粉末を取出し、再度、投入して 3 時間混合の計 8 時間の混合として、粉末投入口に付着したと考えられる混合不足の粉末を5 時間混合後の 粉末で洗浄する対策(以下、「2 段混合」という。)を実施した。後半の4 ラン(試験ラン No. L1CZ0205-L1CZ0208)では、比較のため2 段混合は実施せず、連続8 時間の混合とした。

この結果、2 段混合を実施した試験ランでは、仕様を超えるプルトニウムスポットが観察 されなかったのに対し、2 段混合を実施しなかった試験ランでは、仕様を超えるプルトニウ ムスポットが観察され、又試験ラン No. L1CZ0206 及び L1CZ0208 では、プルトニウムスポッ トのプルトニウム濃度が、使用した MH-MOX 粉末と同等のものも観察された。

これらのことから、プルトニウムスポットの発生原因は、粉末投入口に付着したプルト ニウム粉末の混入によるもので、これに対しては 2 段混合を行うことで十分均一となるこ とが分かった。総混合時間は、短縮できる可能性がある。2 段混合を実施した場合、1 段混 合では 38kgMOX を処理するのに 2 シフト(8h 勤務/シフト)であったものが 4 シフトかかる ことになるが、造粒工程も 38kgMOX の処理に 4 シフトかかっているため、全工程のペレット製造能力には影響ない。しかしながら、2 段混合を実施することは工程が煩雑となるため、 混合方法については今後も検討を継続する。

2.4.1.2 ペレット品質

2.3.1.2 に述べたとおり、内側燃料仕様の8 ランのうち、最初の3 ラン(L1CZ0101-L1CZ0103) では平均焼結密度が仕様の中心(85%TD)となるような製造条件を選定し、その後の5 ラン (L1CZ0104-L1CZ0108)では焼結密度のばらつき低減方法について検討した。(L1CZ0106 及 び L1CZ0108 は、均一化混合後に試験ランを2 分割し、38kgM0X から 19kgM0X とした。)

外側燃料仕様の8ラン(L1CZ0201-L1CZ0208)では、ポアフォーマ添加率4水準、繰り返 し回数2回でペレット製造を行い、ポアフォーマ添加率がペレット製造工程設備の運転条 件や製造されるペレット品質へ与える影響について検討した。詳細は、以下の通りである。

(1) ポアフォーマ添加率と平均焼結密度の関係

ポアフォーマ添加率に対する平均焼結密度の結果を表 2.4 及び図 2.5 に示す。ポアフォ ーマ添加率の増加に従い平均焼結密度は低下し、この結果、ペレット仕様中心(85%TD) となるポアフォーマ添加率は、外側燃料仕様で約 2.1wt%、内側燃料仕様で約 2.3wt%とな った。

しかしながら、図 2.5 に示すように、ポアフォーマ添加率が高いほど、試験ラン毎に平 均焼結密度がばらついており、ポアフォーマ添加率が 2wt%を超えるような領域では平均 焼結密度が安定せず、安定した MOX 燃料ペレット製造を行ないにくい。より安定した燃料 製造を行うためには、ポアフォーマ添加率を下げる手立てを検討する必要がある。

又、内側燃料仕様のペレットの平均焼結密度は、外側燃料仕様のペレットに比べ高い。 この時点では、燃料仕様(プルトニウム富化度)の違いによるものなのか、乾式回収粉末 の違いによるものなのか断定できなかったが、後に実施した乾式回収粉末に関する試験 (A4 試験)の結果、乾式回収粉末の物性の違いによることがわかった。詳細は 2.4.2.3 に述べる。

(2) 結晶粒径

図 2.6 から図 2.8 に焼結ペレットの金相写真を示す。ポアフォーマ添加率が 1.6wt%である L1CZ0101 の金相写真(図 2.6)では、ポアは均一に分散し、マトリックス部の結晶も 十分成長していることが分かる。

一方、ポアフォーマ添加率が2wt%を超えるL1CZ0108及びL1CZ0208の金相写真(図2.7 及び図2.8)では、ポアの一部が凝集し、マトリックス部の結晶成長も図2.6に比べ進ん でいない。ポアの凝集は、ポアフォーマ添加率が高すぎることにより、ポアフォーマ間の 距離が十分確保できないためであると考える。マトリックス部の結晶は、ポアフォーマに より成長が阻害されたことを示しており、図 2.5 においてポアフォーマ添加率が 1.6wt% を超える領域で、ポアフォーマ添加率に対する平均焼結密度の低下率(傾き)が急になった結果とも整合する。

図 2.9 に焼結ペレットの蒸発性不純物と平均結晶粒径の関係を示す。この結果、蒸発性 不純物の上昇に伴い、平均結晶粒径が小さくなっていることが分かる。さらに、図 2.10 にポアフォーマ添加率と蒸発性不純物の関係を示す。この図より、ポアフォーマ添加率の 上昇と共に、蒸発性不純物含有率が増加していることが分かる。

これらの結果から、ポアフォーマ添加率の増加に従い、蒸発性不純物の生成量が増加し、 マトリックス部の結晶成長が阻害されたものと考えられる。

(3) 脱ガス/再焼結

L1CZ0102 の焼結後ペレットについて脱ガス/再焼結を実施し、その効果を確認した。 L1CZ0102 は B1 から B4 の 4 容器で構成されており、3 容器(B1-B3)については 900℃で1 時間の脱ガス後に 1700℃で 2 時間の再焼結を実施し、1 容器(B4)は脱ガスを行わずに 1700℃で 2 時間の再焼結のみ実施した。さらに B3 容器は、脱ガス/再焼結を 2 回実施し た。

脱ガス/再焼結による焼結密度の変化は表 2.5 及び図 2.11 に示す通りであり、脱ガス /再焼結により焼結密度は上昇し、焼結密度の標準偏差は小さくなった。しかしながら、 このような傾向は再焼結のみを実施した B4 についても見られたことから、平均焼結密度 の上昇は、脱ガス/再焼結による効果以前に焼結不足による焼きしまりの影響がほとんど であると考える。又、2 度の脱ガス/再焼結を実施した B3 容器では、1 回目に比べ2 回目 の変化量が小さくなった。

図 2.12 に B3 容器の脱ガス/再焼結によるペレット毎の焼結密度の変化を示す。1回目の脱ガス/再焼結では、焼結密度の低いペレットほど大きな密度上昇を示した(図2.12(a)参照)。2回目の脱ガス/再焼結においても焼結密度の低いペレットほど密度上昇量が大きい傾向は見られるものの、1回目に比べその変化量は小さい(図2.12(b)参照)。従って、再焼結や脱ガス/再焼結による平均焼結密度の上昇は、低密度側に分布したペレットが、高密度側に引き上げられた結果である。

表 2.6 に示すとおり、焼結ペレットの脱ガス/再焼結による分析値(0/M,蒸発性不純物含有率,炭素不純物含有率,平均結晶粒径)も、1回目の脱ガス/再焼結で蒸発性不純物含有率が減少し平均結晶粒径が大きくなったが、2回目の脱ガス/再焼結では分析値に大きな変化は見られなかった。

このように脱ガス/再焼結により、蒸発性不純物の減少と平均焼結密度の大きな上昇が 確認されたが、平均焼結密度の大きな上昇は単に再焼結するだけでも確認された。これは、 初焼結での焼結時間が不足していたためと考える。2回目の脱ガス/再焼結による平均焼 結密度の上昇は、1回目に比べ小さいことから、焼結時間を4時間とすれば焼結不足の大 半は解消されると考える。

(4) 焼結密度のばらつきとその低減対策の効果

本試験での焼結密度のばらつきは、これまで実施した「もんじゅ」燃料製造と同等であ るが、「常陽」燃料製造(0.5%TD 程度)に比べ大きいことから、内側仕様の5ラン(L1CZ0104 からL1CZ0108)では、ばらつきの低減を試みた。図2.13にグリーンペレットの密度の標準 備差と焼結密度の標準偏差の関係を示す。この図より、グリーンペレットの密度の標準 偏差の増加に伴い、焼結密度の標準偏差が指数関数的に大きくなることが分かる。従って、 ばらつき低減対策は、グリーンペレットの密度のばらつきの主原因であるポアフォーマの 偏在を防止することを中心に実施した。実施内容は、表2.7に示す通りである。

この結果、添加混合 I 以降の試験ランサイズを縮小したケース、造粒良品のみで成型したケース及び脱脂時間を延長したケースで効果が見られた(表 2.8 参照)。以下、詳細を述べる。

造粒処理単位の縮小

図 2.14 に添加混合 I 工程から造粒工程の処理の概要を示す。まず、供給ホッパに装荷 された MOX 粉末は、ロータリープレスでタブレット状に粗成型された後、ロールクラッシ ャで解砕され造粒粉となる。得られた造粒粉は、メッシュにより良品(250 µm~850 µm の造粒粉)とアンダー品(250 µm 以下の造粒粉)に分級される。アンダー品は再度供給 ホッパに戻され、上記の粗成型及び分級を繰り返す。このような一連の処理を数回(数パ ス)行うことで良品の造粒粉が確保される。通常は、良品収率が90%に達したところで造 粒処理を終了し、良品とアンダー品を合わせて造粒処理の製品とする。(すなわち、造粒 製品は、良品 90%とアンダー品10%からなる。)

L1CZ1106、L1CZ0106、L1CZ1108及びL1CZ0108では、造粒処理の処理単位を通常の38kgM0Xから半分の19kgM0Xに縮小した。これらのうち、L1CZ1106を除く試験ランでは、造粒収率の増加が見られる。これは、通常の半分の量で造粒処理したことによりMOX粉末の発熱によるバインダの熱劣化(バインダであるステアリン酸亜鉛の融点は約120℃)が抑えられた結果、造粒粉の強度が維持され、ポアフォーマの分離が減少したものと考える。

図 2.15 にポアフォーマ添加率に対するグリーンペレットの密度の標準偏差を示す。この図からも、L1CZ0106, L1CZ0108 及びL1CZ1108 のグリーンペレットの密度の標準偏差が、 他と比べ小さいことが分かる。

L1CZ1106 においても同様に試験ランを縮小したが、造粒処理開始直後に設備トラブルが 発生し、供給ホッパ内にほぼ全量の MOX 粉末(バインダ及びポアフォーマを混合済みの MOX 粉末約 19kg)を装荷したまま約5時間停止した。この結果、造粒収率が著しく低下し、 焼結密度のばらつきも大きくなった。これは、添加剤を含む MOX 粉末がホッパ内に長時間 滞留したことでバインダが熱劣化したためと考えられる。 すなわち、Am-241が蓄積して比発熱量が増加した原料を用いる場合、処理単位を19kgMOX とすることによりバインダの熱劣化防止に効果的であることが確認できたが、それだけで は不十分で、速やかに造粒処理を行うことも同時に必要であることもわかった。ホッパ内 の粉末がどの程度の時間でバインダの熱劣化に影響するのかについては、第二期製造条件 確認試験でホッパ内の MOX 粉末の温度測定を実施して確認した(3.4 参照)。

② 造粒良品のみでの成型

上述のとおり、通常、グリーンペレットは、造粒処理の結果得られた造粒良品 90%とア ンダー品 10%の粉末で成型されるが、L1CZ0106 では、造粒処理で得られたアンダー品を別 に回収し、造粒良品のみでグリーンペレットを成型した。この結果、L1CZ0106 では、他 に比ベグリーンペレット及び焼結密度のばらつきが極めて小さく、又、平均焼結密度が高 くなった(図 2.15 及び表 2.8 参照)。これまでの経験からアンダー品にはポアフォーマが 偏ることが分かっており、焼結密度の上昇は、アンダー品を回収したことで試験ランのポ アフォーマ含有率が低下した影響である。

アンダー品は、造粒良品に比べ粒度が細かく、又、ポアフォーマ含有率が高いために比 重が軽く、処理の過程で造粒良品の中に偏在しやすい傾向にあると考えられる。造粒良品 とアンダー品のポアフォーマ含有率が同一であれば、アンダー品が偏在しても焼結密度の ばらつきには影響しないが、アンダー品のポアフォーマ含有率が高いことにより、アンダ ー品の偏在がポアフォーマの偏在を引き起こす。さらに、アンダー品は、造粒粉となりき れなかった粉末の集合であるため、MOX粉末とポアフォーマは分離している可能性が高く、 これもポアフォーマの偏在に拍車をかけ、結果、焼結密度のばらつきが大きくなる。

上記の結果と考察から、ポアフォーマの偏在の低減には、アンダー品の発生量低減が効 果的であると考えられるが、現在の設備でアンダー品発生量を減らすことは困難である。 このため、発生したアンダー品は回収して、当該ロットの造粒製品には混ぜずに、次ロッ トの粉末と均一化混合するという手段も対策として考えられるが、上述のとおりアンダー 品の回収は平均焼結密度の上昇を引き起こすため、平均焼結密度はアンダー品の発生量 (回収量)やポアフォーマのアンダー品への偏りの程度に影響を受ける。今後、燃料製造 を通して、アンダー品の回収・次ロットへの混合により、平均焼結密度がどの程度変動し、 密度収率の向上に寄与するか検討すべきと考える。

③ 脱脂時間の延長

脱脂時間を4時間に延長したL1CZ0107は、脱脂後ペレット内の不純物を減らすことで 焼結性を高め、焼結密度のばらつき低減を狙ったが、脱脂後ペレットの炭素含有率及び焼 結後ペレットの蒸発性不純物含有率は、脱脂時間を2時間としたものと大きな差はなかっ た。本試験ロットは、成型工程まではばらつき低減対策を施していないが、グリーンペレ ットの密度のばらつきは、他に比べ非常に小さい(図 2.15 参照)。従って、L1CZ0107 で 焼結密度のばらつきが減少した要因は、脱脂時間の延長によるものではなく、偶然的にグ リーンペレットのばらつきが減少した可能性を否定できず、1 ランの結果で結論付けるこ とは出来ない。今後、試験を実施し、確証する必要がある。

2.4.2 乾式回収粉末の影響評価試験(A4 試験)の結果

A4 試験の結果を以下に示す。

2.4.2.1 造粒性,成型性への影響

表 2.9 に造粒処理の結果を示す。

乾式回収粉末の混合率 5~25%では、造粒処理の1パス目の造粒収率及び総パス回数(良 品収率が 90%に達するまでの造粒処理回数)に大きな違いは見られないが、40%とするとタ ブレットがもろくなり、造粒収率が著しく低下、総パス回数が増加した。

乾式回収粉末の種類では、旧乾回を用いた試験ラン(L1CZ0206)の方が、タブレットが ・・・・ もろい傾向にあり、新乾回を用いた場合に比べ造粒収率が悪くなった。又、このようなタ ブレットがもろくなる現象は、ポアフォーマを添加すると促進される傾向を示した。

これらの結果から、造粒収率を悪化させる原因は、共通してタブレット強度が影響して おり、その原因は、MOX 粉末の発熱によるバインダの熱劣化と、ポアフォーマや乾式回収粉 末に影響される粉末の結合性の悪化にあると考えられる。前者に対しては、2.4.1.2(4)で 述べたとおり、造粒処理時の取扱単位を小さくする、冷却対策を行うなどの熱対策が効果 的である。後者に対しては、バインダの増加や粗成型圧の調整が効果的であると考えられ、 乾式回収粉末の粒度や混合率の違いに対して、このような造粒条件をこまめに調整する必 要がある。

2.4.2.2 グリーンペレットの密度

図 2.16 にグリーンペレットの密度の測定結果を示す。内側燃料仕様、外側燃料仕様共に、 乾式回収粉末の混合率の増加に従いグリーンペレットの密度は増加した。乾式回収粉末は スクラップペレットを粉砕して得られた粉末であるため、そのかさ密度は原料粉末に比べ 高く、乾式回収粉末の混合率の増加に伴うグリーンペレットの密度の増加はこの影響であ る。

グリーンペレットの密度の標準偏差は、内側燃料仕様、外側燃料仕様共に、乾式回収粉 末の混合率の増加に従い増加した。これは、前述のとおり、乾式回収粉末の増加に伴い造 粒粉の強度が低下し、造粒粉とポアフォーマの分離が増したためと考える。

2.4.2.3 平均焼結密度

図 2.17(a)に内側燃料仕様の平均焼結密度の結果を示す。乾式回収粉末はすべて新乾回粉 を用いた。ポアフォーマ添加率は 2.3wt%で一定であるにも係らず、乾式回収粉末の混合率 の増加に伴い平均焼結密度は低下した。 図 2.17(b)に外側燃料仕様の平均焼結密度の結果を示す。乾式回収粉末の混合率 25wt%の 結果を除き、すべて新乾回粉を用いている。新乾回粉を用いた場合、乾式回収粉末の混合 率を増しても平均焼結密度はほぼ一定となり、ポアフォーマ無添加で約 95%TD、ポアフォー マ 2.1wt%添加で約 89%TD となった。これは、内側燃料仕様の結果(図 2.17(a))とは異な る傾向であり、ポアフォーマ添加率の違いが影響していると考える。すなわち、内側燃料 仕様では、外側燃料仕様に比べポアフォーマ添加率が高いことでより焼結の進行が阻害さ れる状態にあり、ここに乾式回収粉末の混合率を上昇させた結果、その相乗効果で平均焼 結密度が低下したと考える。このような現象は、ポアフォーマ添加率 2.1wt%では現れず、 あたかもポアフォーマ添加率 2.1wt% から 2.3wt%の間にしきい値があるように振舞った。 又、ポアフォーマによる安定した気孔の形成による密度低下ではないため、再焼結により 大きな焼きしまりを生じる可能性もある。これらは、焼結時間と深く係っていると考えら れ、2.5 で詳細に検討する。

基礎試験(A1 試験)では、平均焼結密度が85%TD となるポアフォーマ添加率は、新乾回 粉を用いた内側燃料仕様で約2.3wt%、旧乾回粉を用いた外側燃料仕様で約2.1wt%となり、 燃料仕様(プルトニウム富化度)で違いが生じた。この原因は、プルトニウム富化度の違 いによるものなのか、乾式回収粉末の違いによるものなのかはっきりしなかったが、本試 験の新乾回粉を用いた外側燃料仕様のペレット製造試験では、ポアフォーマを2.1wt%添加 しても平均焼結密度は約89%TD と、基礎試験の結果に比べ約4%TD も高い結果となった。ポ アフォーマ添加率と平均焼結密度の関係について、基礎試験の結果(図2.5)と本試験の外 側仕様での結果を組み合わせると図2.18のようになる。この図より、平均焼結密度は、乾 式回収粉末の種類(旧乾回粉と新乾回粉)に大きく依存していることが分かる。従って、 基礎試験で内側燃料仕様と外側燃料仕様で平均焼結密度に差が生じた原因は、主に乾式回 収粉末の種類によるものと考える。

又、旧乾回粉を25wt%混合した場合、ポアフォーマ無添加では、新乾回粉を用いた場合の 平均焼結密度と大きな差は無いにも係らず、ポアフォーマを2.1wt%添加すると平均焼結密 度が81~84%TD程度となり、新乾回粉を使用したペレットの結果と大きく乖離するという 興味を引く現象を示した。この原因も、焼結時間との関係が深いと考えられ、2.5で詳細に 検討する。

2.4.2.4 焼結密度のばらつき

焼結密度の標準偏差は平均焼結密度と深い関係を示し、ポアフォーマ添加率が同じであっても平均焼結密度が低い結果を示した試験ランほど焼結密度の標準偏差が大きくなった (図 2.17 参照)。2.4.2.3の結果とあわせて検討すると、ポアフォーマの焼結阻害効果を大 きく受け平均焼結密度が低下した試験ランで、焼結密度のばらつきが大きくなったと考え ることができる。

このように焼結密度のばらつきには、ポアフォーマによる焼結阻害効果も影響しており、

2.5 で詳細に考察する。

2.4.2.5 分析結果

分析結果については、すべての試験ランにおいて燃料仕様を満足した。(付録6参照)

2.4.3 造粒・整粒設備試験(A2 試験)の結果

A2 試験の結果を以下に示す。造粒・整粒設備の評価にあたっては、同様のペレット製造 条件で混合・造粒設備を使用した A1 試験(試験ラン No. L1CZ0206 及び L1CZ0208)のペレ ット製造結果と比較した。

2.4.3.1 設備性能

造粒・整粒設備と混合・造粒設備の処理能力について、造粒パス毎の製造収率(良品重 量/打錠重量)で比較した。図 2.19 に各設備における造粒パス毎の製造収率を示す。1 パ ス目の製造収率は両設備で同等であったが、2 パス目以降は造粒・整粒設備の製造収率が大 きく減少した。この結果、混合・造粒設備では、3~7 パスで製造収率累計が 90%に達した のに対し、造粒・整粒設備では、6 パスで 76%であり(処理は 6 パスで打ち切った。)、7 パ ス以降のパスごとの製造収率を 20%と仮定した場合、処理終了の目安としている製造収率累 計 90%を達成するためには、10 パス必要と試算される。

造粒 2 パス目以降の良品収率の低下は、アンダー品サイクロンとその後段にある微粉捕 集装置の構造による影響が大きい(図 2.20 参照)。気流搬送で搬送されたアンダー品は、 まず、その多くがアンダー品サイクロンで回収され、そこで回収し切れなかった微粉末が 後段の微粉捕集装置で回収される。従って、アンダー品サイクロンを通って微粉捕集装置 まで達した粉末は、MOX 粉末よりも極めて比重の小さい添加剤の割合が高いと考えられる。 さらに、微粉捕集装置は、微粉末を含んだ空気がフィルタ内を通過する構造であるため、 粉末が付着しやすく、特に比重の軽い添加剤は、選択的にフィルタに捕集されると考えら れる。又、フィルタには、逆洗機能(気流を逆流させてフィルタの目詰まりを解消する機 能。)もない。この結果、2 パス目以降の MOX 粉末は、バインダが不足した状態となり、タ ブレットの強度が低下し、製造収率が低下したと考える。

さらに、フィルタの目詰まりにより造粒処理を中断して微粉捕集装置のフィルタの清掃 運転を行う必要があり、1パスの造粒処理にかかる時間が混合・造粒設備と比べ約2倍となった。このため、添加剤を含む MOX 粉末がホッパ内に長時間滞留し、バインダが熱劣化したことも製造収率の低下を助長したと考える。

2.4.3.2 ペレット品質

表 2.10 にグリーンペレット及び焼結ペレットの密度の結果をそれぞれ示す。グリーンペレットの平均密度については設備間の差はみられないが、密度の標準偏差は混合・造粒設

備を使用した A1 試験ランに比べて大きな値を示した。焼結ペレットについては、平均焼結 密度が 86%TD 程度と高くなり、焼結密度の標準偏差も 2.8%TD 程度と大きな値を示した。

グリーンペレット及び焼結ペレットの密度の標準偏差が大きい原因は、前述のとおりタ ブレット強度が低下し、造粒粉からポアフォーマが分離したためと考える。これは、図 2.21 に示す焼結ペレットの金相写真からも分かる。ポアフォーマが造粒粉に閉じ込められ分離 がない場合は、図 2.6のようにポアフォーマの均一な分散が確認できるが、図 2.21のポア フォーマは造粒粉らしき塊の周りに偏在し、造粒粉から分離したことを示している。

又、平均焼結密度が高くなった原因は、アンダー品の一部を試験ランから回収した影響である。本試験では、前述のとおり造粒処理を途中で打ち切ったため、アンダー品が通常よりも多く発生し、一部をスクラップ粉末として試験ランから回収した。アンダー品は、良好な造粒粉と比較してポアフォーマを多く含むため、アンダー品を回収したことにより、試験ランのポアフォーマ含有率が減少し、平均焼結密度が高めとなった。

分析値については、各試験ランとも「もんじゅ」燃料仕様を満足した。(付録6参照)

2.4.4 ペレット焼結設備の性能評価試験(A3 試験)の結果

A3 試験の結果を以下に示す。

2.4.4.1 4 炉間の焼結性能の比較

ポアフォーマを無添加とした L1CZ9216 の炉別の焼結密度と焼結ペレットの分析結果を表 2.11 に示す。各焼結ペレットの平均焼結密度、焼結密度の標準偏差及び分析結果は、ほぼ 同等の値を示した。これより、各炉の焼結性能は同等であり、ペレットの品質もほぼ均一 のものが得られることが確認できた。

2.4.4.2 脱脂及び焼結性能

ポアフォーマを添加したグリーンペレットを用いて脱脂・焼結処理を行った結果を以下 に示す。

(1) 脱脂後ペレットの分析値

脱脂後の 0/M は 2.1 程度、C 不純物含有率は 1100~1200ppm 程度であり、既設の予備焼結 設備で処理したペレットと同等であった。(付録 6 参照)

(2) 平均焼結密度と焼結密度の標準偏差

表 2.12 に焼結密度の結果を示す。試験結果の比較には、A1 試験において本試験と同一条 件で製造された試験ランである L1CZ0206 と L1CZ0208 の結果を用いる。

平均焼結密度は 82.6%TD~84.4%TD の範囲でばらついた。平均焼結密度が試験ランごとに ばらつく現象は、A1 試験のポアフォーマ添加率が 2wt%を超える領域でも見られ(図 2.5 参 照)、比較に用いた L1CZ0206 と L1CZ0208 の平均焼結密度もそれぞれ 81.3%TD と 84.3%TD と、 ほぼ同程度にばらついている。本試験の試験ランのポアフォーマ添加率も 2.1wt%と高く、 試験ランごとに平均焼結密度がばらついたのは、A1 試験同様、ポアフォーマ添加率が高い ことによるものと考える。

焼結密度の標準偏差については、L1CZ0216 のみが 2.87%TD と大きく、その他のランでは A1 試験の 1.7%TD と同程度であった。L1CZ0216 のグリーンペレットも基本的には他と同じ 条件で製造されたものであるが、造粒工程で約 12wt%のアンダー品が加えられている(通常 は 10wt%以下)。この影響でポアフォーマの偏在が大きくなり、焼結密度の標準偏差が大き くなったと考える。(アンダー品による焼結密度のばらつきへの影響は、2.4.1.2(4)②参照)

(3) グリーンペレットのポアフォーマ含有率

ポアフォーマを添加した 5 ランについて、炉別の平均焼結密度の結果を図 2.22 に示す。 ポアフォーマ無添加とした場合とは異なり、L1CZ0211、212 及び 216 では炉 No.1 側で高密 度、炉 No.4 側で低密度となる傾向が見られた。ポアフォーマ無添加のグリーンペレットを 用いた場合には、このような現象は生じていないことから、グリーンペレットのポアフォ ーマ含有率が容器ごとにばらついていることが原因と考えられた。

成型工程では、通常、図 2.23(a)に示すような手順で焼結用の皿容器(容器は 18 枚の Mo 製の焼結皿から構成される)にグリーンペレットを整列し、各炉で焼結する。成型機への供 給粉末にポアフォーマの偏在があった場合、ある皿容器にポアフォーマを多く含むグリー ンペレットが偏り、この結果、平均焼結密度は、容器ごと(炉ごと)に差が生じる。L1CZ0211、 212 及び 216 では、通常の成型順で整列した。これを考慮して、L1CZ0217 では、成型機へ の供給粉末にポアフォーマの偏在があった場合でも、4 炉にできるだけ同条件のグリーンペ レットを供給するような整列方法を採用した。整列手順を図 2.23(b)に示す。この結果、 L1CZ0217 では、4 炉間の平均焼結密度はほぼ等しくなった。

この結果から、グリーンペレットは、後半に成型されたものほどポアフォーマ含有率が 高くなるような傾向があることが確認された。

なお、L1CZ0218 は、造粒処理時の処理単位を通常の半分としてポアフォーマの偏在低減 を図った試験ランであり、試験ラン全体の焼結密度のばらつきが小さいことが、4 炉間での 平均焼結密度の差も小さくなるよう作用したものと考える。

(4) 物性分析值

L1CZ0217 の 0/M がもんじゅ仕様下限値 1.94 をやや下回ったが、それ以外は燃料仕様を満 足した。L1CZ0217 の 0/M は、脱ガス/再焼結を実施することで仕様を満足した。(付録 6 参 照)

2.4.4.3 脱ガス/再焼結性能

(1) 焼結密度の変化

脱ガス/再焼結による焼結密度の変化を表 2.13 及び図 2.24 に示す。脱ガス/再焼結の

実施により、平均焼結密度の上昇及び焼結密度の標準偏差の減少が見られた。同様の傾向 は、単に再焼結しただけでも見られた(L1CZ0211)。従って、これらの密度上昇は脱ガスに よる効果以前に 2 時間の焼結時間では焼結時間が不足していることを示す結果であり、過 大な焼きしまりを生じる可能性を示した。

類似の現象は A1 試験で実施した脱ガス/再焼結でも見られたが、2回目の脱ガス/再焼 結での密度上昇は A1 試験よりも大きい。これは、本試験では乾式回収粉末に旧乾回粉を用 いたのに対し、A1 試験で脱ガス/再焼結したペレットには新乾回粉が用いられていたこと が影響しているものと考える。すなわち、乾式回収粉末の違いによっても、焼きしまりに 差が生じる可能性を示すものである。

なお、このような傾向をより深く調査するため、第二期製造条件確認試験において、再 焼結による焼きしまり試験を実施した(3.2参照)。

(2) 分析物性值

脱ガス/再焼結による焼結ペレットの分析値の変化を表 2.14 に示す。0/M は、脱ガス/ 再焼結(1回目)を行うことにより、燃料仕様の範囲内で上昇した。これは、初焼結から脱 ガス/再焼結(1回目)までの期間で、0/M がドリフトしたためと考える。

脱ガス/再焼結により蒸発性不純物含有率が減少し、結晶粒径が成長するような傾向も みられたが、中には脱ガス/再焼結により蒸発性不純物が上昇し、結晶粒の成長が見られ ないものもあった。この原因は、ペレットのポアフォーマ含有率が、サンプルごとにばら ついたためと考えられるが、詳細は不明である。

2.4.4.4 脱脂·焼結連続処理

表 2.12 に示すとおり、脱脂・焼結連続処理で処理した L1CZ0218 の平均焼結密度は 82.6%TD と、従来熱処理法で処理した他のランに比べ低い。しかし、A1 試験においてもポアフォー マ添加率が 2wt%を超える領域では、平均焼結密度は、試験ランごとに 81.3~84.3%TD の範 囲でばらついており(図 2.5 参照)、L1CZ0218 の平均焼結密度もこの範囲である。

本試験では、1 ランの処理しか行っておらず、データのばらつきによるものか否か判断で きないため、今後試験データを積み重ね平均焼結密度への影響を把握する必要がある。

なお、連続処理後のペレットの脱ガス/再焼結では、他の試験ランに比べ平均焼結密度 の上昇が小さいため、仮に連続処理によって平均焼結密度が低いペレットが得られるとし ても、その後の焼きしまりが十分に小さければ、問題はないと考える。

又、焼結ペレットに含まれる不純物量も、従来熱処理法と同等であった(付録 6 参照)。 さらに、脱脂・焼結連続処理では、脱脂・焼結工程を同一設備で連続的に処理でき、従来 熱処理法と比較して1ロットの処理あたり1シフトの短縮となった。

以上から、脱脂・焼結連続処理で得られるペレットの品質は同等であり、かつ、処理時 間は従来に比べ短縮できることから、燃料製造への適用は有意義であると考える。 2.4.5 連続予備焼結・連続焼結設備の性能評価試験(A5 試験)の結果
 A5 試験の結果を以下に示す。

2.4.5.1 脱脂後ペレットの分析値

0/Mは2.1程度、炭素不純物含有率は1100ppm程度であり、既設の予備焼結設備で処理したペレットの0/M、炭素不純物含有率と同等であった。(付録6参照)

2.4.5.2 焼結ペレット

(1) 平均焼結密度

表 2.15 に焼結密度の結果を既設の焼結設備を使用した A1 試験の結果と合わせて示す。 本試験での製造条件は、A1 試験において平均焼結密度が約 85%TD となる条件としたが、平 均焼結密度は約 87%TD とやや高めの結果であった。これは、本試験の焼結時間が A1 試験の 2 時間よりも長い約 4 時間であることに加え、使用した乾式回収粉末の粒度が A1 試験で使 用したものよりも細かく活性であるためであると考える(2.4.2.3 参照)。

(2) 焼結密度の標準偏差

L1CZ0220の焼結密度の標準偏差は、1.3%TDとA1試験の約1.6%TDよりも小さくなった(表2.15参照)。これは、本試験の焼結時間がA1試験の2時間よりも長い約4時間であることに加え、焼結炉の構造上、既設の焼結設備では焼結皿18枚単位(約10kgMOX単位)で焼結されるのに対し、連続焼結炉では6枚単位(約3kgMOX単位)で焼結されるため、より均一に焼結処理されたためと考える。

一方、L1CZ0219の焼結密度の標準偏差は、1.7%TDと大きくなった。L1CZ0219は、造粒工 程でタブレットがもろく、収率が低いという状況であった。このため、造粒粉の強度が低 下してポアフォーマが造粒粉から分離し、焼結密度のばらつきが大きくなったものと考え る。

(3) 分析值

L1CZ0219 は燃料仕様を満足した。L1CZ0220 はプルトニウムスポットを除き、仕様を満足した。(付録6参照)

2.5 考察

2.5.1 ポアフォーマ添加率と平均焼結密度

ポアフォーマによるペレットの低密度化が気孔の形成だけによる場合、ポアフォーマ添加率と平均焼結密度の関係は直線、あるいはそれに近い関係になるはずであるが、ポアフォーマ添加率がある水準を超えた場合、図 2.5 に示したとおり、ポアフォーマ添加率の増加に対し平均焼結密度は急落する。平均焼結密度 85%TD に相当するポアフォーマ添加率は、

この急落領域にあり、平均焼結密度は試験ランごとに不安定となった。

この原因は、ペレットのポアフォーマ含有率の分布(偏在)とポアフォーマによる焼結 阻害効果で説明できる。図 2.25 にグリーンペレットのポアフォーマ含有率と焼結密度の関 係模式図を示す。図 2.25(a)はポアフォーマ添加率が低いものを、図 2.25(b)は高いものを 示す。個々のグリーンペレットのポアフォーマ含有率は、ポアフォーマ添加率の増加に伴 いばらつきが大きくなるような分布を持つ(図 2.25(a)よりも、図 2.25(b)の分布の方が広 い。)。ここで、焼結時間が一定の場合、ポアフォーマによる焼結の阻害は、ポアフォーマ 含有率がある値を超えると焼結不足となって現れる。ポアフォーマ添加率が増加すると、 グリーンペレットのポアフォーマ含有率の平均値は増加し、又、その分布の拡がりも大き くなるため、焼結不足となるペレットの割合が増え、焼結密度の分布は低密度側への偏り が大きくなる。これらの結果、ポアフォーマ添加率が低い領域では、ポアフォーマ添加率 と平均焼結密度の関係は、ほぼ直線となるのに対し、ポアフォーマ添加率がある値を超え ると、焼結不足となるペレットの影響で平均焼結密度は急落するように振舞うものと考え る。

2.5.2 焼結密度のばらつきについて

低密度ペレット製造において最も重要な課題である密度収率の向上を達成するためには、 焼結密度のばらつきを低減する必要がある。低密度ペレットの焼結密度のばらつきは、ポ アフォーマの偏在(分布)に加え、それが焼結挙動へ及ぼす影響との相乗効果で拡大する。 以下これらについて議論する。

2.5.2.1 ポアフォーマの偏在(分布)

ポアフォーマは、MOX 粉末に比べ極めて密度が低く偏在しやすいため、造粒粉の中にポア フォーマを閉じ込めることでこれを緩和している。しかし、造粒粉の強度が低いと造粒粉 が壊れ、ポアフォーマが分離して偏在(分布)が生じる。従って、ポアフォーマの分布を 小さくするためには、造粒粉強度の向上・維持が効果的である。

本試験とこれまでの経験から、造粒粉の強度低下の原因には、バインダの熱劣化、旧乾 回粉末(より粗い乾式回収粉末)の使用、乾式回収粉末の混合率の増加及びポアフォーマ 添加率の増加が挙げられる。バインダの熱劣化に対しては、処理単位を縮小すること及び 添加剤混合後に速やかに造粒処理することなど、造粒処理時の熱対策が効果的であること は、2.4.1.2(4)に述べた。粗い乾式回収粉末の使用及び乾式回収粉末の混合率の増加に対 しては、バインダ添加量や粗成型圧力等の造粒条件を調整することで対応できる。一方、 ポアフォーマ添加率は、目標とする焼結密度で決まるため、これを低減するためには、ポ アフォーマに頼らずに焼結密度を下げる方策が不可欠である。焼結密度は、A4 試験の結果 から、乾式回収粉末の粒度を調整することで低減できる可能性があり、これについては、 2.5.2.3 で検討する。 2.5.2.2 ポアフォーマ添加率と焼結時間

図 2.26 に 1700℃×2 時間で初焼結後のペレットと、それを 1700℃で2 時間再焼結したペレットの焼結密度の分布を示す(一部脱ガスを実施しているが、2.4.1.2 (3)で述べたとおり、脱ガスの影響は無視できる。)。初焼結後の焼結ペレットの分布は、2.5.1 で述べた原因により、低密度側に偏った分布を示し、その後の再焼結により、低密度側に分布したペレットは高密度側に引き上げられ、焼結密度のばらつきは緩和された。すなわち、ポアフォーマにより焼結の進行を阻害され低密度側に分布したペレットは、焼結密度の飽和値が低いわけではなく、図 2.27 の模式図のように、他に比べ焼結速度が遅い結果、低密度化したものと考える。

新乾回粉を用いた A4 試験では、ポアフォーマ添加率を 2.3wt%として、乾式回収粉末混合率を変化させた結果、乾式回収粉末混合率の増加に従い平均焼結密度は低下した(図 2.17(a)参照)。この現象も、図 2.27 に示すように、乾式回収粉末とポアフォーマ添加率の増加により焼結速度が低下するとの仮定で説明できる。しかしながら、乾式回収粉末の増加に伴う平均焼結密度の低下現象は、ポアフォーマ添加率 2.1wt%では現れなかった(図 2.17(b)参照)。新乾回粉は粒度が細かく、焼結性に対する活性度が高いため、その増加に対する焼結密度の反応は鈍感で、相当量(2.3wt%以上)のポアフォーマが添加された状況で、その影響が現れたものと考える。

一方、旧乾回粉については、混合率をパラメータにした試験を実施していないため、予 想の域を出ないが、ポアフォーマ添加率に対する平均焼結密度の変化が新乾回粉を用いた 場合に比べ大きいことから、混合率の増加に対しても、焼結密度はより敏感に低下すると 考える。

又、ペレットは18枚の焼結皿から構成される容器に整列され、容器単位で焼結される(連 続焼結炉では6枚ずつ焼結される)ため、焼結皿のペレット位置によって還元ガスの受け 方や雰囲気温度に差が生じ、焼結条件が均一ではない。ポアフォーマ添加率が高い領域で は、焼結密度は焼結環境の影響をより強く受けると考えられるため、焼結環境のばらつき は、焼結密度のばらつきをさらに大きくする。これを模式的にあらわすと、図2.28のよう になる。

これらの考察から、約 1.5wt%を超えるポアフォーマを添加する場合、ポアフォーマのば らつきやペレットの皿位置の違いによる焼結速度の低下を踏まえ、焼結時間はより長く取 る必要があると考える。

2.5.2.3 乾式回収粉末について

A1 試験及びA4 試験の結果、新乾回粉よりも旧乾回粉を用いた方が焼結密度は低下した(図 2.18 参照)。これは、旧乾回粉の粒が新乾回粉に比べ粗いことよるもので、粒の粗い乾式回 収粉末を用いることで、原料粉末と乾式回収粉末の間に形成されたギャップが、比較的大 きな気孔として残ったためであると考える。ポアフォーマ添加率の低減は、造粒粉の強度 向上だけでなく、偏在原因そのものであるポアフォーマを減らすことであるため、焼結密 度のばらつき低減に最も効果的である。(ポアフォーマ添加率が 1.6wt%を超えると、平均焼 結密度も試験ランごとに不安定となる。)

一方、乾式回収粉末の粒を粗くすると、乾式回収粉末が焼結に対し不活性となる効果と、 ポアフォーマによる焼結の進行を阻害する効果との相乗効果により、焼結速度は極端に低 下する。焼結速度に対し焼結時間が不足すると、焼きしまりの大きなペレットとなり、焼 結密度のばらつきも大きくなる。しかしながら、バッチ式の焼結炉の2 交代勤務による運 転パターンを考慮すると、焼結時間は4 時間程度が最大と見るべきである。このため、低 密度ペレット製造の乾式回収粉末は、できるだけ焼結密度を低減させる効果が強いながら も、4時間程度の焼結で焼結密度の上昇が大方飽和するようなものが求められる。

通常、焼結ペレットの焼きしまりは、数µm以下のマイクロポアの収縮・消滅により発生 する。このため、中途半端な粗さの乾式回収粉末を用いた場合、マイクロポアだけが増え、 焼結速度の低下や、焼きしまりの増加だけを招く可能性が高い。一方、極端に粗い乾式回 収粉末を用いた場合、図 2.29に示すように、乾式回収粉末により生成する気孔のピークは、 数十µm以上となり、数µm以下のマイクロポアの発生量は従来程度に抑えつつ、焼きしま りに無関係な大きな気孔の存在比を高めることが可能かもしれない。このようなことが可 能になれば、焼結密度が低く、かつ焼きしまりが小さいペレットを得ることが可能である。 これについては、第二期製造条件確認試験でさらに検討を行った。

3. 第二期製造条件確認試験

3.1 試験概要

第一期製造条件確認試験の結果、密度収率向上のためには、ポアフォーマ添加率の低減、 造粒粉の強度上昇及び焼きしまり特性の把握が必要であることがわかった。ポアフォーマ 添加率の低減は、乾式回収粉末の粒度・混合率を調整することで達成できる可能性を得た。 又、Am-241 が蓄積し高発熱となった原料を用いる場合、造粒処理時の処理単位を小さくす ることでバインダの熱劣化が抑制され、造粒粉の強度上昇につながることも分かった。

第二期製造条件確認試験では、これらについてさらに知見を深めるため、焼結後ペレットの再焼結(焼きしまり)試験、乾式回収粉末の最適化試験及び造粒処理時の粉末温度測 定試験を実施した。

3.2 焼きしまり試験

3.2.1 試験目的

第一期製造条件確認試験において、1700℃×2 時間で焼結したペレットを再焼結すると、 初焼結時の焼結不足から比較的大きな焼きしまりを生じた。高速増殖炉の燃料ペレットは、 軽水炉の燃料ペレットに比ベスウェリングが大きいため、原子炉内での焼きしまりが原子 炉の熱設計に与える影響は、軽水炉燃料に比べ小さいが、原子炉の熱設計上、焼きしまり は可能な限り小さいほうが望ましい。

1700℃×24時間の再焼結による焼きしまり量が4%TD以下の場合、原子炉内での焼きしま りは、1700℃×24時間の再焼結による焼きしまりと同程度であると報告されている⁽²⁾。又、 MIMAS 法により製造された MOX ペレットの 1700℃×24 時間の再焼結による体積変化と、原 子炉内での照射による体積変化の最大値は、同程度であるとの報告もある⁽³⁾。これらを踏 まえ、本試験では、第一期製造条件確認試験で得られた低密度ペレットに対し、24 時間の 再焼結を実施して低密度ペレットの焼きしまり特性を評価する。

3.2.2 試験方法

(1) 再焼結による焼結密度の測定

第一期製造条件確認試験で得られた L1CZ0207、208、219 の焼結ペレットに対し、再焼結 による焼きしまり挙動を観察した。試験パラメータは、ポアフォーマ添加率及び乾式回収 粉末の種類(新乾回粉と旧乾回粉)とした。表 3.1 に上記 3 ランの第一期製造条件確認試 験での製造条件を示す。L1CZ0219 は連続炉で 4.3 時間初焼結したもので、その他の 2 ラン はバッチ式の焼結炉で 2 時間初焼結したものである。

まず、これら3ランから焼結ペレットを約80個ずつランダムに採取し、それらの平均焼 結密度及び焼結密度の標準偏差を測定し、本試験の基準値とした。その後、これらのペレ ットについて、1700℃にて2時間又は4時間ずつ累積24時間の再焼結を実施し、平均焼結 密度、焼結密度の標準偏差及び結晶粒径の変化を観察した。

なお、本試験はA1試験で用いた焼結設備で再焼結を行った。

(2) 気孔分布測定

L1CZ0208 の 2 時間焼結後(初焼結)・6 時間焼結後(初焼結+4 時間の再焼結)・26 時間焼 結後(初焼結+24 時間の再焼結)のペレット断面の金相写真を画像解析することで、気孔分 布及び気孔面積割合を取得し、再焼結による気孔分布変化を観察した。気孔分布変化の観 察には、初焼結後の焼結密度が 84.4~85.1%TD とほぼ同等のペレットを用いた。

3.2.3 試験結果

(1) 焼きしまりの傾向

再焼結による平均焼結密度の変化を表 3.2 及び図 3.1 に示す。これより、すべての試験 ランにおいて累積焼結時間 6 時間程度で密度の上昇が飽和していることがわかる。又、焼 結密度の標準偏差も焼結の進行と共に小さくなり、累積焼結時間 6 時間でほとんど変化が みられないことが確認できる。

L1CZ0219 は初焼結時間が他より長いため焼きしまりは小さいが、他の試験ランと累積焼 結時間で比較すると、初期(累積焼結時間4~6時間)の密度上昇がやや大きく、焼結密度 の標準偏差の変化も大きい。2.4.5.2 で述べたように、L1CZ0219 は造粒工程での収率が悪 く、焼結密度のばらつきが大きかった試験ランである。本試験の基準測定時でも、焼結密 度の標準偏差は1.6%TDと他の2ランよりも大きく、焼結不足により低密度側に分布したペ レットをより多く含むと考えられる。再焼結により、このようなペレットの焼結が進んだ 結果、当該ペレットの焼結密度が高密度側に引き上げられ、他の試験ランよりも平均焼結 密度の上昇がやや大きくなったものと考える。

図 3.1 に示す 3 ランの再焼結 2 時間以降(初焼結時間を含めると 4 時間以降)の焼きしま りは、最大のもので 0.7%TD であった。従って、焼結時間が 4 時間程度であれば、その後の 1700℃×24 時間の再焼結による焼きしまりは、1%TD 以下になると考える。

(2) ポアフォーマ添加率の影響

図 3.1のL1CZ0207とL1CZ0208に注目し、ポアフォーマ添加率の影響を比較する。L1CZ0207 とL1CZ0208 では、製造条件のうちポアフォーマ添加率だけが異なり、それぞれ 1.6wt%と 2.1wt%である。ポアフォーマを 1.6wt%添加したL1CZ0207の最終到達密度は 88.4%TD で飽和 しており、ポアフォーマ添加率 2.1wt%のL1CZ0208の最終到達密度は 86.7%TD で飽和してい る。又、L1CZ0207の焼きしまりは 1.2%TD であり、L1CZ0208 では 1.6%TD であった。これよ り、ポアフォーマ添加率を増やすことで最終到達密度は低くなり、焼きしまりは大きくな ることが確認された。

上記の結果は、ポアフォーマにより形成された大きな気孔は、再焼結によってほとんど

収縮することなく安定に存在することを示している。又、ポアフォーマの添加率の増加に ともなう焼きしまりの増加は、第一期製造条件確認試験で考察したように、ポアフォーマ の添加による焼結の阻害効果で焼結速度が低下したためと考える。

(3) 新・旧乾回粉の影響

図 3.1 の L1CZ0208 と L1CZ0219 に注目し、乾式回収粉末の影響(新乾回粉と旧乾回粉の 影響)を確認する。L1CZ0208 と L1CZ0219 では、製造条件のうち乾式回収粉末の種類だけが 異なり、L1CZ0208 では旧乾回粉を使用し、L1CZ0219 では新乾回粉を用いた。最終到達密度 は、旧乾回粉を使用した L1CZ0208 で 86.7%TD、新乾回粉を使用した L1CZ0219 で 88.2%TD と なり、より粒の粗い旧乾回粉を使用した方が最終到達密度は低下した。この結果、旧乾回 粉を用いた方が、ポアフォーマ添加率を低減できるため、低密度ペレット製造には、旧乾 回粉の方が有利であることが分かった。

しかし、L1CZ0208 の平均焼結密度は、2 時間の再焼結(初焼結を含め4時間の焼結)で 86.2%TD となった(表3.2参照)。従って、焼結時間を4時間として、平均焼結密度を「も んじゅ」燃料ペレットの仕様の中心である 85%TD とするためには、ポアフォーマ添加率を 2.1wt%以上とする必要がある。ポアフォーマ添加率が約1.6wt%を超えると平均焼結密度は 安定せず、又、焼結密度のばらつきも大きくなる。このため、旧乾回粉よりもさらに粗い 乾回粉を用いて、焼結密度の低減化を検討する必要があると考える。

(4) 結晶粒径

L1CZ0207、208、219の平均結晶粒径の変化を図 3.2 に示す。4 時間の再焼結で大きく成 長していることがわかる。又、密度上昇が累積焼結 6 時間で飽和しているのに対し、結晶 粒径は累積焼結 6 時間後も焼結時間の延長に伴い成長傾向を示している。これは、初期の 結晶粒成長はマトリックス部の密度上昇に寄与するが、ある程度成長すると焼結密度には ほとんど影響を及ぼさないことを示している。

(5) 気孔分布の変化と焼結密度の変化

図 3.3 に 2 時間焼結後(初焼結後)、6 時間焼結後(再焼結 4 時間後)、26 時間焼結後(再 焼結 24 時間後)の 1mm² あたりに存在する気孔数分布を示す。再焼結時間の経過に伴い、気 孔径 4µm 未満の小さな気孔が減少したが、気孔径 4µm 以上の気孔ではほとんど変化が見 られなかった。

又、図 3.4 に再焼結による 4μm 未満の気孔の減少割合を示す。4μm 未満の気孔の減少は 再焼結 4 時間までに偏っている。焼結時間 6 時間までで焼結密度の上昇が飽和したのは、 焼結時間 6 時間までで気孔径 4μm 未満の気孔の収縮がほぼ終了したためであると考える。

Maier らは、1700℃×2.2 時間及び 1700℃×3 時間で焼結した焼結密度約 94%TD の UO₂ペレットに対し、1700℃×180 時間の再焼結試験を行った結果、気孔径約 4µm 未満の気孔の

減少が認められ、それ以上の気孔径ではほとんど変化が見られなかった⁽⁴⁾と報告しており、 本試験の観察結果と一致する。

3.3 乾式回収粉末の最適化試験

3.3.1 試験目的

A4 試験の結果、より粒の粗い乾式回収粉末を用いることでペレットの焼結密度は低下し、 ポアフォーマ添加率を低減できる可能性を得た。ポアフォーマ添加率の低減は、造粒粉の 強度向上だけでなく、焼結密度のばらつきの主原因そのものであるポアフォーマを減らす ことであるため、焼結密度のばらつき低減に最も効果的である。

本試験では、乾式回収粉末の製造パラメータを調整して、より粒径の大きな乾式回収粉 末を数種類製造し、このうち低密度ペレットの製造に最も適すると考えられる乾式回収粉 末を用いてペレット製造試験を実施する。

3.3.2 乾式回収粉末の準備

乾式回収粉末は、粒の粗いものを用いた方が焼結密度の大きな降下効果が期待されるが、 乾式回収粉末が粗すぎると成型性等に悪影響を及ぼすことも懸念される。このため、過去 の燃料製造実績を考慮して、使用できる乾式回収粉末の範囲を設定することとした。粗さ の指標には、比表面積(BET)を用いた。以前の「もんじゅ」燃料製造及びそれに関連した 試験で用いられた乾式回収粉末の比表面積と平均粒径を表 3.3 に示す。本表に示すとおり、 「もんじゅ」燃料製造では、比表面積 0.15m²/g から 0.68m²/g の乾式回収粉末の使用実績が

あり、1991年に実施された乾式回収粉末の混合試験においても比表面積 0.22m²/g の乾式回 収粉末を使用し、70%まで混合率を高めても問題ないと報告されている。これらの実績か ら、本試験で使用する乾式回収粉末は、比表面積 0.2m²/g から 0.5m²/g 程度を目標とした。

乾式回収粉末は、ロールクラッシャでペレットを粗粉砕した後、ジェットミルで微粉化 して得られる。より粒の粗い乾式回収粉末を得るため、ロールクラッシャのロールクリア ランス、分級メッシュの目開き及びジェットミルの粉砕パス回数を変動させ、4 種類の乾式 回収粉末を製造した。乾式回収粉末の処理条件と、得られた乾式回収粉末の物性測定の結 果を表 3.4 に示す。又、各乾式回収粉末の SEM 写真を図 3.5 に示す。この結果、No.3 と No.4 の乾式回収粉末において、目標とした比表面積 0.2~0.5m²/g となり、このうち粗粉砕処理 しか行っていない No.4 の乾式回収粉末の比表面積が、0.21m²/g と最も小さくなった。ジェ ットミルによる粉砕処理まで行った粉末の SEM 写真 (No.0~3) では、大部分を細かな粉末 が占め、一部に巨大な丸い粉末が混じっているのが観察されるが、粗粉砕処理のみの粉末

(No. 4) では、全体的に粒が大きく角張っている。第一期製造条件確認試験で焼結密度低下の効果が見られた旧乾回粉の SEM 写真からも、旧乾回粉の形状は、No. 0~3 のものよりもNo. 4 に近いと考えられた。これらの結果を踏まえ、本試験では、No. 4 の乾式回収粉末を使用することとした。
なお、平均粒径については、試験条件によらず同じような値となったが、SEM 写真からも ジェットミルによる粉砕処理まで行った粉末と、粗粉砕処理のみの粉末では、粒径が明ら かに異なっており、粒度分布が同等とは考えにくい。MOX 粉末の粒径は、MOX 粉末を含む水 を撹拌し、水中に浮遊する MOX 粉末の粒径をレーザーで測定することで得られる。従って、 粒の粗い乾式回収粉末は重く、水中に浮遊できずに、正確な粒度分布が測定できなかった 可能性が高いと考えられる。

3.3.3 試験方法

本試験では、粒の粗い乾式回収粉末を用いて 2 ランのペレット製造試験を行い、得られ たペレットについて 24 時間の再焼結を実施した。ラン1 では乾式回収粉末の混合率を 25wt%、 ラン2 では 40wt%とした。試験フロー及びグリーンペレットの製造条件を図 3.6 及び表 3.5 にそれぞれ示す。添加剤添加率等の条件は、A4 試験にあわせて設定したが、ラン2 では、 3.3.4.1(1) で述べるとおり、造粒処理が困難となったため、ポアフォーマ添加率を下げ、 バインダ添加率を増加した。

造粒処理は、添加剤への崩壊熱の影響を考慮し、1 容器分(約 19kg) ずつ処理した。成型工程以降は、1 つのランを 4 容器 (容器 A-D) で構成し、容器ごとに熱処理条件を変えて、 焼結密度への影響を比較した。容器 A 及び容器 B は第一期製造条件確認試験と同様、脱脂 条件 800℃×2 時間、焼結条件 1700℃×2 時間とし基準条件としたもの、容器 C は焼結処理 の昇温時に 1100℃×1 時間の中間キープを行いペレット内の炭素の除去を促すことを試み たもの、容器 D は基準条件よりも脱脂時間を延長して 800℃×4 時間としたものとした。又、 容器 A には、穴のあいた焼結皿(焼結雰囲気ガスのよどみを改善するために、ガスの通気 孔を設けた焼結皿)を使用し、別の 3 容器については、通常の焼結皿を使用した。各熱処 理条件等は、表 3.6 のとおりである。

グリーンペレットを通常通り焼結皿に整列した場合、ポアフォーマの偏在により、容器 ごとの平均焼結密度に差が発生することがわかっている(2.4.4.2(3)参照)ことから、こ れをできるだけ抑えるため、グリーンペレットの整列は、A3 試験のL1CZ0217 と同等の方法 を用いた。

3.3.4 試験結果

3.3.4.1 造粒性

各ランの造粒処理は、崩壊熱によるバインダの熱劣化を避けるため、1 容器ずつ行った。 造粒処理結果を表 3.7 に示す。詳細は以下のとおりである。

(1) ラン1(乾式回収粉末混合率 25wt%)

1 容器目では、タブレットが気送ラインに詰まり、その回収作業の間、添加剤混合後の 粉末をホッパ内に長時間保管した結果、添加剤が劣化し、1 パス目の良品収率 37.5%、総 パス回数 7 パスと悪い結果となった。タブレットが気送ラインに詰まった原因は、粗い 乾式回収粉末の使用により、タブレットの重量が増加したためである。

2 容器目では、1 容器目の結果を踏まえ、タブレット厚さを 2.0mm から 1.8mm に薄くしたことによりタブレットの詰まりは無くなり、その結果 1 パス目の良品収率 47%、総パス回数 4 パスと比較的よい結果を示した。

これらの結果、乾式回収粉末の混合率 25wt%以下では、バインダ添加率 0.5wt%、ポアフォーマ添加率 2.1wt%の条件で、比較的良好なタブレットが作れると考える。

(2) ラン2(乾式回収粉末混合率 40wt%)

1 容器目では、ラン1の結果を踏まえ、タブレット厚みを1.8mm として造粒処理を行ったが、タブレットが非常に脆く、1 パス目の良品収率23.2%、総パス回数8 パスと極端に悪くなった。

2 容器目では、1 容器目の結果を踏まえ、ポアフォーマ添加率を 2.1wt%から 1.6wt%に、 バインダ添加率を 0.5wt%から 0.8wt%に、タブレット厚みを 1.8mm から 1.6mm に変更した ところタブレットの強度が増し、1 パス目の良品収率 42%、総パス回数 7 パスと、ラン1 に比べ結果はよくないが、改善傾向は見られた。

この結果、乾式回収粉末の混合率を 40wt%とした場合、25wt%と同条件では造粒処理が 困難であるが、添加剤添加率を調整するなどしてタブレット強度を増すことで良品収率 が向上する見通しも得た。後述するが、ラン 2 の平均焼結密度は約 77~80%TD であった ため、燃料仕様を満足するためにはさらにポアフォーマ添加率を下げることが可能であ り、タブレット強度の向上が期待できる。

3.3.4.2 成型性

成型処理では、ラン1、ラン2共に目立った充填不良はなく、成型残粉量も通常と同程度 であった。グリーンペレットの密度のばらつきについても、従来の乾式回収粉末を用いた 場合と同程度であった(表 3.8 参照)。このため、成型性については、特段問題ないことが 確認できた。

3.3.4.3 焼結密度

焼結密度の結果を表 3.9 に示す。詳細は以下のとおりである。

(1) 平均焼結密度

ラン1では、ポアフォーマ無添加で平均焼結密度が約92%TD、ポアフォーマ2.1%添加 で約77~80%TD、ラン2では、ポアフォーマ無添加で約87%TD、ポアフォーマ1.6%添加で 約77~78%TDであった。このため、第一期製造条件確認試験に比べ、より少ないポアフ ォーマの添加で平均焼結密度が85%TDに達することが確認できた。

熱処理条件の比較では、基準条件(容器 A, B)と脱脂 4 時間(容器 D)の平均焼結密 度がほぼ同等であったのに対し、1100℃で中間キープ(容器 C)を行ったものは若干高く なった。これは、1100℃の中間キープ中にある程度焼結が進み、実質の焼結時間が長く なったためと考える。

(2) 焼結密度のばらつき

焼結密度の標準偏差は、ポアフォーマ無添加を除き、ラン1で約1.0~1.5%TD、ラン2 で約0.6~0.9%TDと、ラン2の方が小さくなった。これは、ラン2のポアフォーマ添加 率が低いためであると考える。

熱処理条件の比較では、脱脂4時間(容器 D)の焼結密度の標準偏差が最も小さく、ラン1で1.02%TD、ラン2で0.60%TDとなった。このような傾向は、第一期製造条件確認試験でも見られた。脱脂時間を延長したことにより焼結密度のばらつきが減少した原因は、800℃×2時間の脱脂では脱脂が不十分であること、脱脂後ペレットの 0/M のばらつきが減少したことなどが考えられるが、詳細は不明であり、今後試験データを蓄積して検討する必要がある。

本試験では、成型時にペレットの並べ替えを行い、焼結容器ごとに熱処理条件を変え たため、試験ラン全体の焼結密度の標準偏差は評価しにくいが、ラン2の容器Dについ て試験ランを代表しているであろうと考えられる箇所について、焼結密度の抜取測定を 行った結果、焼結密度の標準偏差は約1.1%TDであった。図3.7にポアフォーマ添加率と 焼結密度の標準偏差の関係について、第一期製造条件確認試験の結果と本試験の結果を 合わせて示す。第一期製造条件確認試験では、焼結密度の標準偏差がポアフォーマ添加 率に依存したことが分かる。本試験では一点のデータしか得られていないが、第一期製 造条件確認試験の結果とほぼ同じ値を示したことから、第一期製造条件確認試験と同様、 ポアフォーマ添加率に依存すると考える。本試験では、ポアフォーマを過剰に添加して いるため、ポアフォーマ添加率を平均焼結密度85%TDに相当する値までの減少すること で、焼結密度の標準偏差はさらに小さくなると考える。

3.3.4.4 分析物性測定值

表 3.10 に主な分析物性測定値を示す。粗い乾式回収粉末を用いることで均一化混合工程での粉砕混合効果が低下し、プルトニウムスポットが大きくなることが懸念されたが、MOX 燃料ペレットの仕様を満足した。又、焼結ペレットに含まれる炭素不純物は低いが、蒸発性不純物+水分含有率及び 0/M が仕様を外れた(0/M は低すぎた)。このため、各試験ランの容器 D

(脱脂 4 時間) について、2 時間の再焼結を行った結果、表 3.11 に示すとおり蒸発性不純物は、ラン1 で 75 μ L/g (再焼結前は 127 μ L/g)、ラン2 で 56 μ L/g (再焼結前は 177 μ L/g) となった (0/M についても、ラン1、ラン2 ともに 1.98 となったが、初焼結から再焼結ま での保管中にドリフトし、仕様を満足した可能性が高い。)。この結果、焼結時間を 4 時間 とすることで、蒸発性不純物は仕様を満足すると考える。

0/Mについては、脱脂後ペレットに含有する炭素不純物の量が多いとその還元により、焼

結ペレットの 0/M が下がることが、これまでの燃料製造の経験から分かっている。上述の とおり、平均焼結密度 85%TD とするためにはポアフォーマ添加率を下げる必要があるため、 ポアフォーマ添加率の低下により脱脂後ペレットの炭素不純物が減少し、焼結後ペレット の 0/M は上昇すると考える。又、ポアフォーマ添加率の低下により、蒸発性不純物も減少 する。

3.3.4.5 再焼結(焼きしまり)

ラン1(乾式回収粉末混合率 25wt%)の再焼結による焼結密度の変化を図 3.8(a)に示す。 ポアフォーマ無添加の焼結ペレットでは、1700℃×24 時間の再焼結による焼きしまりがほ とんど見られないが、ポアフォーマを 2.1wt%添加した焼結ペレットでは大きな焼きしまり が発生した。ポアフォーマを 2.1wt%添加した焼結ペレットで発生した焼きしまりは、再焼 結 2 時間までが非常に大きく 2%TD を超えたが、その後は上昇率が低下し、再焼結 2 時間か ら 24 時間では約 1.75%TD であった。このため、再焼結初期に発生した大きな焼きしまりは、 ポアフォーマの添加によりペレットの焼結速度が低下し、初焼結で焼結不足となった結果 であると考える。従って、再焼結 2 時間までに発生した大きな焼きしまりは、初焼結の焼 結時間を 4 時間とすることで大きく減少できると考える。又、ポアフォーマの有無で焼き しまりに大きな差があることから、焼きしまりの大小は、ポアフォーマ添加率に依存する と考えられ、再焼結 2 時間以降に現れた焼きしまりについても、ポアフォーマ添加率を下 げることで低減できると考える。

ラン2(乾式回収粉末混合率40wt%)の再焼結による焼結密度の変化を図3.8(b)に示す。 ラン2では、ポアフォーマ無添加の場合でも、1%TD以上の焼きしまりが発生し、ポアフォ ーマを1.6wt%添加した場合の再焼結2時間以降の焼きしまりは、3%TDを超えた。このため、 乾式回収粉末を40%混合した場合は、再焼結による焼きしまりを小さく抑えることは、困難 であると考える。

3.3.5 考察

3.3.5.1 粗い乾式回収粉末による焼結密度の低下について

図3.9にポアフォーマ無添加の焼結ペレットの金相写真を示す。ラン1及びラン2共に、 ポアフォーマ無添加の場合でも比較的大きな気孔が確認できる。図3.10に本試験のポアフ ォーマ無添加の焼結ペレットの金相写真と、第一期製造条件確認試験で新乾回粉を用いて 得られたペレットの金相写真から、気孔の分布を数値化したものを示す。この図から、本 試験で得られたペレットでは、4µm以下の気孔の存在量に大きな差がないにも係らず、そ れより大きな気孔の存在量が増加していることが分かる。図3.11の模式図に示すように、 本試験で用いた乾式回収粉末の粒は、他の原料粉末(プルトニウム原料粉末及びウラン原 料粉末)に比べ巨大で、かつ、焼結過程で収縮しにくいため、両者の間に生じたすき間が 気孔を形成し、この結果、マトリックス部の焼結密度が低くなり、焼結密度の低下に寄与 したと考える。 図 3.12 にポアフォーマを 2.1wt%添加した容器 D(脱脂 4 時間)の焼結ペレットの金相写 真を示す。金相写真からは、ポアフォーマ無添加の場合(図 3.9)に比べ結晶粒が小さく、 ポアフォーマを添加することにより、結晶粒の成長が阻害されたことが分かる(平均結晶 粒径は、ポアフォーマ無添加で約 9 µ m、ポアフォーマ 2.1wt%添加で約 4 µ m であった。)。 又、再焼結を重ねるにつれ結晶粒は成長した。

図3.13にポアフォーマ添加率と焼結密度の関係を、第一期製造条件確認試験の結果と合わせて示す。第一期製造条件確認試験で用いた乾式回収粉末に比べ、本試験で用いた乾式 回収粉末の方が、ポアフォーマ添加率に対する焼結密度の低下率(傾き)が大きい。これ は、本試験のペレットの方が、ポアフォーマによる焼結の阻害をより大きく受けたことを 示す。図3.8(a)に示したとおり、ラン1のポアフォーマ無添加では、焼きしまりは生じな かったが、ポアフォーマを添加すると大きな焼きしまりを生じたことも、これを裏付ける。 ポアフォーマ添加率に対する焼結密度の傾きは、本試験の乾式回収粉末(比表面積約 0.2m²/g)、旧乾式回収粉末(比表面積約 0.5m²/g)、新乾式回収粉末(比表面積約 1m²/g)の 順に大きく、比表面積の小さい順に並ぶ。これは、使用する乾式回収粉末の焼結性が不活 性であればあるほど、ポアフォーマによる焼結の阻害の影響を大きく受け、平均焼結密度 が低下することを示す。すなわち、本試験で用いた乾式回収粉末は、粒が粗いことにより 気孔を形成し低密度化に貢献するプラス面と同時に、焼結性が不活性となることによりポ アフォーマによる焼結の阻害の影響を大きく受けるというマイナス面をもたらした。ポア フォーマによる焼結の阻害が大きいと平均焼結密度は安定せず、焼結密度のばらつきは大 きく、焼きしまりも大きくなる。

しかし、粗い乾式回収粉末の使用は、ポアフォーマ添加率の低減ももたらすため、焼結 の阻害の影響も緩和される。これらの関係を乾式回収粉末の混合率と焼きしまりとして示 すと、図 3.14 のようになる。乾式回収粉末の混合率が低ければポアフォーマ添加率の増加 から焼きしまりは増加し、逆に乾式回収粉末の混合率を増加させるとポアフォーマ添加率 は低下するが、乾式回収粉末とポアフォーマの相乗効果により焼きしまりは増加する。こ の結果、乾式回収粉末の混合率と焼きしまりの関係は下に凸の関係となる。燃料製造にお いては、ポアフォーマ添加率はできるだけ低く抑え、焼結密度のばらつきを小さくしたい。 このため、より乾式回収粉末による焼結密度の低下効果が得られるように、乾式回収粉末 の混合率を高めたいが、乾式回収粉末の混合率がある水準を超えると焼きしまりは大きく なる。過大な焼きしまりは原子炉の熱設計上問題になる可能性があるため、焼きしまりは ある程度以下に抑える必要がある。この結果、両者の要求を満足するような条件が、乾式 回収粉末の種類ごとに存在することになる。

今後、試験データを拡充し、粒の粗い乾式回収粉末を用いることによるプラス効果とマ イナス効果を定量的に評価する必要がある。マイナス効果を抑えるためには、図 3.14 に示 したように混合率を焼結性の観点から許容できる量にまで制限する、あるいは、ボールミ ル混合時間を延長して活性度を増加する、原料粉末の活性度を上げて乾式回収粉末の低活 性度を補うなどの措置が考えられる。これらの効果についても、今後、試験で確認する必要がある。

3.3.5.2 ポアフォーマ添加率と焼きしまりについて

上述の考察を踏まえ、ここでは乾式回収粉末混合率 25wt%の試験結果を基に、平均焼結密 度 85%TD に相当するポアフォーマ添加率とその焼きしまりを検討する。

図 3.15 に、ラン1の結果を用いて初焼結を4時間とした場合に平均焼結密度85%TD に相当するポアフォーマ添加率と、当該ペレットの24時間再焼結による焼きしまりを予想する。 検討には、再焼結2時間後(初焼結からの累積焼結時間は4時間)と、再焼結28時間後の 平均焼結密度の結果を用いる。

平均焼結密度 85%TD に相当するポアフォーマ添加率は、再焼結 2 時間後の平均焼結密度 から推定すると 1.2wt%となり、再焼結 28 時間後の平均焼結密度から推定すると 1.5wt%と なる。24 時間再焼結による焼きしまりについては、両直線の差から 1.4%TD 以下になると考 える。

さらに、2.5.1 で述べたとおり、ポアフォーマ添加率が低い領域では、ポアフォーマ添加 率と平均焼結密度の関係は線形に近いが、ポアフォーマ添加率が高い領域では、平均焼結 密度は急落し、上に凸の形状となる。これまでの結果から、このようなポアフォーマ添加 率が高い領域における平均焼結密度の急降下は、焼結不足によるものと考えられるため、 焼結時間が長い方が平均焼結密度の降下割合は小さいと予想できる。これを踏まえ、再焼 結2時間後と、再焼結28時間後の線から、ポアフォーマ添加率に対する平均焼結密度の変 化を予想すると、それぞれ点線と一点鎖線のようになる。この結果、24時間再焼結による 焼きしまりは、1.4%TDよりも小さくなると考える。

以上の結果、初焼結を4時間とした場合に平均焼結密度85%TDに相当するポアフォーマ 添加率は1.2wt%から1.5wt%、24時間再焼結による焼きしまりは1%TD程度になると考える。

3.3.5.3 ポアフォーマの粒径と脱脂後ペレット内の不純物

上に述べたとおり、本試験で用いた乾式回収粉末は、ポアフォーマによる焼結の阻害効 果をより強く受け、ポアフォーマによる気孔の形成で期待される効果以上に焼結密度は低 下する。これは、平均焼結密度の不安定化、焼結密度のばらつきの増加及び焼きしまりの 増加をもたらす可能性がある。

低密度ペレット製造にアビセルを導入した当初、粒径をパラメータとしたペレット製造 試験が実施され、粒径が大きいアビセルをポアフォーマとして用いた方が脱脂後ペレット の炭素含有率が減少し、ポアフォーマ添加率の増加に伴う平均焼結密度の急降下もないこ とが報告されている⁽⁵⁾。これは、ポアフォーマの粒径が大きくなることにより、同じ添加 率であっても粒の数が少なくなり、焼結の阻害効果がアビセル周辺の局所にとどまるため、 焼結の阻害の影響が限定的になったものと考えられる。しかしながら、ポアフォーマの均 ーな分散という観点からは、粒径は出来るだけ小さい方が有利と判断し、現在の粒径(70 -100μm)が選択されている。

当時の造粒法は、ロール造粒法であり、現在のタブレット造粒法に比べ、ポアフォーマ の分散がより深刻であったという背景がある。現在は、タブレット造粒法を採用したこと で従来よりもポアフォーマの分散による問題が緩和されていること、粗い乾式回収粉末の 使用でポアフォーマによる焼結阻害の影響がより大きくなる可能性があることを考慮する と、ポアフォーマの粒径を大きくして、この影響を緩和する方が有利であるかもしれない。 今後、乾式回収粉末の種類とポアフォーマの粒径の相性を再確認することも重要であると 考える。

3.3.5.4 焼結密度のばらつきについて

3.3.5.2 の考察を踏まえ、乾式回収粉末の混合率 25wt%でポアフォーマ添加率を 1.2wt% から 1.5wt%として平均焼結密度 85%TD とした場合を想定して、焼結密度のばらつきを評価 する。

3.3.4.3 (2)に述べたとおり、焼結密度の標準偏差は、ポアフォーマ添加率に依存する。 図 3.7 より、ポアフォーマ添加率 1.2wt%から 1.5wt%に相当する焼結密度の標準偏差を見積 もると、約 0.7%TD から約 0.9%TD となる。図 3.16 に平均焼結密度と焼結密度の標準偏差の 関係について、第一期製造条件確認試験の結果と本試験の結果を合わせて示す。第一期製 造条件確認試験では、平均焼結密度 85%TD とするために 2wt%以上のポアフォーマを要し、 焼結密度の標準偏差はほとんどの試験ランで 1%TD を超えたが、本試験の乾式回収粉末を用 いることでこれが大きく改善できることが分かる。

3.4 造粒処理時の粉末温度測定試験

3.4.1 試験目的

A1 試験において、造粒工程での処理単位を 38kgMOX とした場合、造粒良品収率が安定せず、 造粒粉の良品収率が悪いランでは、焼結密度のばらつきも大きくなるという問題があった。 そこで、試験的に造粒工程での処理単位を小さくしたところ、これらの問題が改善された。 製造条件試験では、プルトニウム原料の長期保管により、従来に比べ Am-241 の蓄積が進み崩 壊熱が大きくなった原料が用いられ、造粒粉の良品収率が安定しない原因は、崩壊熱の影響 でバインダが熱劣化したことによるものと考えられる。

本試験では、ホッパ内の粉末温度を測定し、どれくらいの時間でバインダが熱劣化する温度に 達するかを確認する。又、ホッパ内の粉末量をパラメータとして温度測定を行い、バインダの熱 劣化の影響緩和の観点から、添加混合 I 工程から造粒工程の処理単位を検討する。

3.4.2 試験方法

混合装置で MOX 粉末を混合後、ホッパ内に装荷し、時間ごとにホッパ内の MOX 粉末の最高 温度を測定した。MOX 粉末の装荷量は、ロットサイズに相当する 38kgMOX と、その半分の 19kgMOX とした。

図 3.17 に造粒装置のホッパ形状を示す。ホッパの形状は円錐型で、MOX 粉末を撹拌するため内部に 5 段の撹拌羽を有し、燃料製造においてホッパ内に MOX 粉末を装荷した際は撹拌羽を回転させて MOX 粉末の温度の平坦化を図る。又、ホッパ外表面及び撹拌羽内部には冷却用の空気が流れる構造である。

温度測定には、第一期製造条件確認試験の回収粉末を用いた。表 3.12 に温度測定に使用した MOX 粉末の組成を示す。

なお、粉末温度上限の目安は、ステアリン酸亜鉛の融点約120℃を考慮して115℃とした。

3.4.3 試験結果

混合装置からホッパへの装荷直後の粉末温度(0時間)は、19kgMOXで50℃、38kgMOXで 70℃であった。その後、19kgMOXでは約7時間、38kgMOXでは約3時間で115℃程度に達し、 両者とも約115℃程度で安定した(図3.18参照)。温度上昇率が異なるにも係わらず到達温 度が同等であった理由は、38kgMOXではホッパ内の粉末レベルと撹拌羽の位置のバランスが より良く、冷却が効果的に作用した影響と考える(図3.17参照)。このため、ホッパ内粉末 の温度上昇には、MOX粉末量とともに、粉末の位置と撹拌羽の位置との関係も重要なファク ターとなることが分かった。その後、撹拌羽の回転を止めると、粉末温度はさらに上昇し た。

3.4.4 処理単位の検討

1 パスの造粒処理にかかる時間は、19kgMOX で約 2.5 時間、38kgMOX で約 5 時間である。 38kgMOX の場合、目安とする 115℃には 3 時間で達するが、処理が進むとホッパ内の粉末量 は減少する。このため、処理単位を 38kgMOX としても、順調に処理が進んだ場合は、目安 とする 115℃には達しない可能性もあるが、処理が進みホッパ内の粉末レベルが下がると MOX 粉末と羽根の位置関係も変化するため、一概に結論は出せない。又、燃料製造では、処 理の停滞でホッパ内に粉末が長時間停滞する場合があることなどから、添加混合 I 工程か ら造粒工程の処理単位は、処理の時間余裕を長く取れる 19kgMOX が良いと考える。しかし ながら、処理単位を 19kgMOX としても、約 7 時間で 115℃に達することから、出来うる限り ホッパ内に粉末が長時間停滞するような状況を避けると共に、長時間停滞した場合などに おいては、バインダを再添加することも必要であると考える。

4. 結論

低密度 MOX 燃料ペレットの製造条件確認試験の結果、造粒・整粒設備以外の設備については、低密度 MOX 燃料ペレット製造の主力設備として使用できることが確認できた。(造粒・ 整粒設備については、良品収率が安定しないことから混合・造粒設備のバックアップ設備 とする。)

従来の原料に比べ Am-241 の蓄積による崩壊熱が大きい原料の使用に対しては、造粒工程 での処理単位を従来の半分に縮小することでバインダが熱劣化するまでの時間が長くなり、 造粒収率が安定すると共に、焼結密度のばらつきが低減することが分かった。

又、粒の粗い乾式回収粉末を用いることにより、乾式回収粉末と他の原料粉末の間に気 孔が形成され、焼結密度が低下することが分かった。この結果、ポアフォーマ添加率が低 減できると共に、焼結密度のばらつきが小さくなる見通しを得た。一方で、乾式回収粉末 の粒が粗くなることでポアフォーマによる焼結阻害の影響は大きくなり、焼結性が低下す るというマイナス要素も見られたが、乾式回収粉末の混合率を制限し、焼結条件(時間) を調整することで、これらの影響を抑えられることも分かった。

以上の結果、従来の原料に比べ Am-241 の蓄積による崩壊熱が大きい原料を用いても、製造条件を適切に管理することにより、現在設置されている設備で量産規模の低密度燃料製造が安定的に行えることを確認した。

謝辞

本試験におけるサンプルの分析、金相試験は、プルトニウム燃料技術開発センター品質 管理課にお願いしました。膨大な数の分析を快く引き受けて下さいましたことに、お礼申 し上げます。

参考文献

(1) 私信

(2) An Acceptable Model and Related Statistical Methods for the Analysis of Fuel Densification, Regulatory Guide 1.126 Rev.1, U.S. Nuclear Regulatory Commission, March 1978.

(3) L.Gaillot, A.Chotard and J.P.Berton, "Analytical Studies of the Behaviour of MOX Fuel", Proc. Int. Topical Meeting on LWR Fuel Performance, 2-6 March 1997, Portland, Oregon, ANS, La Grange Park, 62(1997).

(4) G.MAIER, H.ASSMANN and W.DÖRR, Journal of Nuclear Materials, 153 (1988) pp.213-220

(5) 私信

試験名称	試験概要	試験数
基礎試験(A1 試験)	燃料製造に使用したことのある設備を用	内側燃料仕様 8 ラン
	いて燃料製造試験を行い、添加剤添加率な	外側燃料仕様8ラン
	どの製造条件の把握・選定と、これら設備	
	の低密度燃料製造への適用性を確認。	
	製造条件及び試験結果は、A2-A5 試験の	
	基準。	
造粒·整粒設備性能確	造粒・整粒設備の低密度燃料製造に対する	外側燃料仕様 2 ラン
認試験(A2 試験)	適用性を確認。	
多機能炉性能確認試	ペレット焼結設備(多機能炉)の低密度燃	外側燃料仕様 5 ラン
験(A3試験)	料製造に対する適用性を確認。	
連続炉性能確認試験	連続予備焼結・焼結設備の低密度燃料製造	外側燃料仕様 2 ラン
(A5 試験)	に対する適用性を確認。	
乾式回収粉末物性評	乾式回収粉末が焼結密度等に与える影響	内側燃料仕様 2 ラン
価試験(A4 試験)	を評価。	外側燃料仕様3ラン

表 2.1 試験概要

表 2.2 第一期製造条件確認試験に使用した乾式回収粉末の代表的な粉末物性値

種類	ロット番号	比表面積(m²/g)	平均粒径 (μm)
新乾回粉	L1TZ0002	1.24	5.47
旧乾回粉	L1T10043	0.46	6.11

試験ラン 番号混合時間 (hr)Pu スポット 最大径(μ m) ()内は濃度試験ラン 番号混合時間 (h)Pu スポー 最大径(()内は濃度L1CZ0101568L1CZ02015+3125L1CZ01025129L1CZ02025+3(42)L1CZ01025129L1CZ02025+378	ット µm) 濃度
L1CZ0101568L1CZ02015+3 (注)125 (注)L1CZ01025129 (39)L1CZ02025+3 (注)78	
L1CZ01025129 (39)L1CZ02025+3 (注)78	
L1CZ0103 5 102 (39) L1CZ0203 5+3 (注) 73	
L1CZ0104 5 94 L1CZ0204 5+3 (注) 91	
L1CZ0105 5 335 (33) L1CZ0205 8 172 (46)	
L1CZ0106 5 551 L1CZ0206 8 126 (48)	
L1CZ0107 5 123 (49) L1CZ0207 8 76	
L1CZ0108 5 222 (41) L1CZ0208 8 188 (55)	

表 2.3 各試験ランの最大プルトニウムスポット(A1 試験)

(注) 2 段混合を実施

計論ラン釆早	ポアフォーマ	焼結密度	測定個数	
呼吸ノノモク	添加率 (wt%)	平均值	標準偏差	的た回数
L1CZ0101	1.6	90.9	1.26	368
L1CZ0102	2.0	88.3	2.01	704
L1CZ0103	2.3	84.8	1.39	689
L1CZ0104	2.3	84.0	1.79	562
L1CZ0105	2.3	85.0	1.23	527
L1CZ0106	2.3	85.9	0.53	227
L1CZ1106	2.3	84.7	2. 58	263
L1CZ0107	2.3	85.1	0.94	559
L1CZ0108	2.3	84.2	0.65	296
L1CZ1108	2.3	86.1	1.50	266

表 2.4(a) 各試験ランのポアフォーマ添加率と焼結密度(A1 試験内側燃料仕様)

対験ラン来早	ポアフォーマ	焼結密度(%TD)		測定個粉
武歌ノン 笛 ち	添加率(wt%)	平均值	標準偏差	側上回剱
L1CZ0201	2. 3	85.6	2.02	328
L1CZ0202	2. 0	81.3	1.57	541
L1CZ0203	1.6	88.1	1.10	509
L1CZ0204	2. 0	92.1	0.79	525
L1CZ0205	2. 3	80.3	2.28	558
L1CZ0206	2.1	81.3	1.61	558
L1CZ0207	1.6	87.4	1.15	562
L1CZ0208	2.1	84.3	1.70	567

表 2.4 (b) 各試験ランのポアフォーマ添加率と焼結密度(A1 試験 外側燃料仕様)

表 2.5 L1CZ0102の脱ガス/再焼結又は再焼結による焼結密度の変化(A1 試験)

容器	焼結密度(%TD) 上段は平均値,下段は標準偏差				
谷奋	初焼結後	脱ガス+再焼結後 ^(注1)	脱ガス+再焼結後 (2 回目) ^(注2)		
D1	88.5	89.0	—		
DI	2.06	1.40	—		
R0	87.8	89.3	—		
DZ	2.46	1.57	_		
B 3	87.3	88.5	88.8		
DO	1.91	1.59	1.47		
D.4	88.5	89.7			
D4	1.14	0.76	—		
会体	88.0	_	_		
14	2.01	—	—		

(注1) B4 は再焼結のみ実施。

(注 2) 2回目の脱ガス/再焼結は B3のみ実施。

測定ポイント	O/M	蒸発性不純物 (μL / g)	炭素不純物 (ppm)	平均結晶粒径 (μm)
焼結後	1.98	106	<30	2.4
1回目の脱ガス/再焼結後 (B3 容器)	1.98	42	<30	3.9
2回目の脱ガス/再焼結後 (B3 容器)	1.99	40	40	3.4

表 2.6 L1CZ0102の脱ガス/再焼結によるペレット分析値の変化(A1 試験)

表 2.7 ばらつき低減対策(A1 試験)

試験ラン番号	ばらつき低減対策	期待される効果
L1CZ0104	造粒粗成型圧力の増加 (2.3ton/cm ² を2.5ton/cm ² に変更)	造粒工程以降の MOX とポアフ ォーマの分離低減
L1CZ0105	添加混合 I の時間を延長 (20 分を 40 分に変更)	MOXとポアフォーマの均一性向 上
L1CZ0106	ランサイズの縮小 (38kgMOX を 19kgMOX に変更) 造粒良品のみで成型	添加剤の熱劣化防止 造粒工程以降の MOX とポアフ ォーマの分離低減
L1CZ1106	ランサイズの縮小 (38kgMOX を 19kgMOX に変更)	添加剤の熱劣化防止
L1CZ0107	予備焼結時間の延長 (2時間を4時間に変更)	ペレットからの添加剤除去効 果向上
L1CZ0108	ランサイズの縮小 (38kgMOX を 19kgMOX に変更)	添加剤の熱劣化防止
L1CZ1108	ランサイズの縮小 (38kgMOX を 19kgMOX に変更) 焼結工程の変更 (予備焼結後に脱ガスを実施)	添加剤の熱劣化防止 ペレットからの添加剤除去効 果向上

		表 2.8 ば	らつき低減対策を	実施した試験ラン	ンの主な製造条件	:と結果 (A1 試験		
影	験ラン番号	L1CZ0104	L1CZ0105	L1CZ0106	L1CZ1106	L1CZ0107	L1CZ0108	L1CZ1108
11	シサイズ	38kg	38kg	19kg	19kg	38kg	19kg	19kg
1 A	'オーマ添加率	2.3wt%	2.3wt%	2.3wt%	2.3wt%	2.3wt%	2.3wt.%	2.3wt%
	粗成型圧力	245MPa (2.5ton/cm ²)	$\begin{array}{c} 225 \mathrm{MPa} \\ (2.3 \mathrm{ton/ cm^2}) \end{array}$	225MPa (2.3ton/cm ²)	$\begin{array}{c} 225 \mathrm{MPa} \\ (2. \ \mathrm{3ton/cm^2}) \end{array}$	$225MPa$ (2. $3 ton/cm^2$)	225 MPa (2. $3 ton/cm^2$)	225MPa (2.3ton/cm ²)
过	1 パス目の 収率	41.3%	50.6%	55.0%	41.7%	55.1%	60.9%	62.3%
	総パス回数	回 9	5 回	2 回	5 回	4 回	3 п	3 回
Π	脱脂条件	$800^{\circ}C \times 2h$	$800^{\circ}C \times 2h$	$800^\circ C \times 2h$	$800^{\circ}C \times 2h$	$800^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$	$800^{\circ}C \times 2h$	$800^{\circ}C \times 2h$ $900^{\circ}C \times 1.5h^{*}$
Ш	脱脂後 炭素不純物			I	I	1010ppm	I	980ppm
	平均焼結密度	84.0%TD	85. 0%TD	85.9%TD	84. 7%TD	85. 9%TD	84. 2%TD	86. 1%TD
弫	密度標準偏差	1.79%TD	1.23%TD	0.53%TD	2. 58%TD	0.94%TD	0. 65%TD	1. 50%TD
	炭素不純物	<30	<30	<30	<30	30	30	<30
	蒸発性不純物 +水分	153	91	100	81	108	159	32
	水	粗成型圧力を 増加	添加混合 I の 時間延長	ランサイズの 縮小	ランサイズの 縮小	脱脂時間の延 長	ランサイズの 縮小	ランサイズの 縮小
	「 L L			造粒良品のみ 使用	造粒処理で長 時間停止			脱脂後脱ガス
								※脱ガス処理

JAEA-Technology 2008-017

き しょう シャック 日本 しょう	メモン 燃料 乾式回収粉末の混合率 ポアフ		ポアフォーマ	造粒処理の結果	
武 験 ノン 金 方	仕様	(乾式回収粉末の種類)	添加率	平均収率	総パス回数
L1CZ0109	内側	5wt% (新乾回粉)	2.3wt%	56.3%	6 回
L1CZ0107 (A1 試験)	内側	25wt% (新乾回粉)	2.3wt%	49.8%	4 回
L1CZ0110	内側	40wt% (新乾回粉)	2.3wt%	48.3%	7 回
L1CZ9213	外側	5wt% (新乾回粉)	0	52.8%	4 回
L1CZ0213	外側	5wt% (新乾回粉)	2.1wt%	53.7%	4 回
L1CZ9214	外側	15wt% (新乾回粉)	0	52.6%	4 回
L1CZ0214	外側	15wt% (新乾回粉)	2.1 wt%	55.2%	4 回
L1CZ9201 (A1 試験)	外側	25wt% (旧乾回粉)	0	59.2%	3 回
L1CZ0206 (A1 試験)	外側	25wt% (旧乾回粉)	2.1 wt%	30.8%	7 回
L1CZ0208 (A1 試験)	外側	25wt% (旧乾回粉)	2.1 wt%	39.9%	5 回
L1CZ9215	外側	40wt% (新乾回粉)	0	46.2%	3 回
L1CZ0215	外側	40wt% (新乾回粉)	2.1 wt%	39.0%	5 回

表 2.9 各試験ランの造粒処理の結果(A4 試験)

使用設備	試験ラン番号	グリーンペレット の密度(%TD)		焼結密度(%TD)	
		平均值	平均值	標準偏差	標準偏差
造粒・整粒設備	L1CZ0209	57.2	86.7	2.801	0.611
(A2 試験)	L1CZ0210	56.9	86.1	2.815	0.623
混合・造粒設備	L1CZ0206	57.1	81.3	1.613	0.283
(A1 試験)	L1CZ0208	56.9	84.3	1.696	0.296

表 2.10 各試験ランのグリーンペレットの密度と焼結密度(A2 試験)

表 2.11 L1CZ9216 の炉別の焼結密度と焼結ペレットの分析値 (A3 試験)

	焼約	吉密度	焼結ペレットの分析値			
炉番号	平均密度	密度の標準	0 /M	炭素不純物	蒸発性不純	平均結晶粒
	(%TD)	偏差(%TD)	07 M	(ppm)	物(µL/g)	径(µm)
1	94.6	0.45	1.97	30	<30	8.4
2	94.7	0.46	1.97	<30	<30	6.5
3	94.4	0.51	1.98	<30	<30	6.7
4	94.2	0. 40	1. 98	<30	<30	7.0

表 2.12 各試験ランの焼結密度(A3 試験)

は田弐借	封殿コン来旦	ポアフォーマ	焼結密	度(%TD)
使用設備	武 阙 ノン 留ち	添加率(wt%)	平均值	標準偏差
	L1CZ0211		84.4	1.49
ペレット焼	L1CZ0212		83.2	1.71
結設備	L1CZ0216		83.7	2.87
(A3 試験)	L1CZ0217	2.1	82.6	1.84
	L1CZ0218		82.8	1.49
焼結設備	L1CZ0206		81.3	1.61
(A1 試験)	L1CZ0208		84.3	1.70

	燒結密度 (%TD)					
計験ニンエロ	上段は平均値、下段は標準偏差					
武駅ノノ 留万	如体外然	脱ガス」再体対效	脱ガス+再焼結後			
	初쁐樎饭	航ル ハキ 中焼箱夜	(2回目) *			
L 1C70911	84.4	85.3	86.8			
L1020211	1.49	1.41	1.13			
L1C70919	83.2	85.0	86.2			
L1020212	1.71	1.35	1.27			
L1C70916	83.7	86.2	—			
L1020210	2.87	2.13	—			
L1C70917	82.5	83.3	—			
L1020217	1.84	1.84	—			
L1C70919	82.8	85.5	_			
L1020210	1.49	1.20	—			

表 2.13 脱ガス/再焼結による焼結密度の変化(A3 試験)

*L1CZ0211は、脱ガスを行わずに再焼結のみを実施。

表 2.14(a) 脱ガス/再焼結によるペレット分析値の変化(1)(A3 試験)

	O/M			蒸発性不純物 (μL/g)		
試験ラン番号	焼結後	脱ガス/ 再焼結後 (1 回目)	脱ガス/ 再焼結後 (2 回目)*	焼結後	脱ガス/ 再焼結後 (1 回目)	脱ガス/ 再焼結後 (2 回目) *
L1CZ0211	1.95	1.96	1.98	110	59	<30
L1CZ0212	1.96	1.97	1.99	179	311	<30
L1CZ0216	1.96	1.98	—	73	<30	—
L1CZ0217	1.93	1.96	—	125	147	—
L1CZ0218	1.96	1.98	—	161	45	—

*L1CZ0211は、脱ガスを行わずに再焼結のみを実施。

表 2.14(b) 脱ガス/再焼結によるペレット分析値の変化(2) (A3 試験)

	炭素不純物(ppm)			平均結晶粒径 (μm)		
試験ラン番号	焼結後	脱ガス/再 焼結後 (1 回目)	脱ガス/ 再焼結後 (2 回目) *	焼結後	脱ガス/ 再焼結後 (1 回目)	脱ガス/ 再焼結後 (2 回目) *
L1CZ0211	<30	<30	<30	2.9	5.3	7.7
L1CZ0212	<30	<30	<30	2.9	3.0	8.8
L1CZ0216	<30	<30	—	3.7	10.1	_
L1CZ0217	<30	<30	—	2.2	3.2	—
L1CZ0218	<30	<30	—	2.7	4.9	—

*L1CZ0211は、脱ガスを行わずに再焼結のみを実施。

使用設備	試験ラン 番号	ポアフォー マ添加率 (wt%)	乾式回収粉 末*混合率 (wt%)	平均焼結密 度(%TD)	焼結密度の 標準偏差 (%TD)
連続予備焼結/連続 焼結設備(A5 試験)	L1CZ0219		25	87.0	1.70
	L1CZ0220	0 1		87.4	1.34
焼結設備 (A1 試験)	L1CZ0206	2.1		81.3	1.61
	L1CZ0208			84.3	1.70

表 2.15 各試験ランの焼結密度(A5 試験)

*A5 試験で使用した乾式回収粉末はA1 試験で使用したものよりも細かい。

	L1CZ0207 (A1 試験)	L1CZ0208 (A1 試験)	L1CZ0219 (A5 試験)
燃料仕様	外側	外側	外側
乾式回収粉末 の種類	旧乾回粉	旧乾回粉	新乾回粉
乾式回収粉末 の混合率(wt%)	25	25	25
ポアフォーマ 添加率(wt%)	1.6	2.1	2.1
初焼結条件	$1700^{\circ}\mathrm{C} \times 2\mathrm{h}$	$1700^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$	1700°C×4. 3h
初焼結に使用 した焼結設備	焼結設備	焼結設備	連続予備焼結 /連続焼結設備

表 3.1 焼きしまり試験対象ペレットの製造条件

表 3.2 焼きしまり試験の結果

	L1CZ0207		L1CZ0208		L1CZ0219	
累積再焼 結時間(h)	平均焼結 密度 (%TD)	焼結密度 の標準偏 差(%TD)	平均焼結 密度 (%TD)	焼結密度 の標準偏 差(%TD)	平均焼結 密度 (%TD)	焼結密度 の標準偏 差(%TD)
0 (基準)	87.2	0.68	85.0	0.73	87.5	1.63
2	88.0	0.65	86.2	0.62	88.1	1.38
4	88.1	0.59	86.3	0.59	88.2	1.30
8	88.2	0.62	86.5	0.58	88.2	1.32
12	88.3	0.60	86.5	0.56	88.2	1.27
16	88.4	0.60	86.6	0.56	88.2	1.25
20	88.4	0.58	86.6	0.54	88.2	1.24
24	88.4	0.55	86.7	0.55	88.2	1.24

燃料製造キャンペーン 名称又は試験名称	比表面積(m²/g)	平均粒径(μm)	混合率
「もんじゅ」初装荷	0.15~0.65	1.83~11.09	\sim 55wt%
「もんじゅ」1 次取替	0.3~0.68	1.17~6.67	~38wt% (大部分は 25wt%)
乾回粉添加試験	0.22	4.26	70wt%まで可能

表3.3 乾式回収粉末の混合実績

表 3.4 乾式回収粉末の処理条件とその物性測定結果(乾式回収粉末の最適化試験)

步士口巾拟士	作臣	試験結果			
<u> </u>	粗粉砕試験	条件	粉砕	比表面積	平均粒径
留り	ロールクリアランス	メッシュ目開	回数	(m^2/g)	(μ m)
0*	上段:0.7mm	0.6 mm	2 回	約1	約 5
1	上段:0.7 mm 下段:0.3 mm	0.6 mm	1 回	0.64	5.97
2	上段:0.7mm 下段:0.5mm	1.2 mm	2 回	0.91	4.1
3	上段:0.7mm 下段:0.5mm	1.2 mm	1回	0.58	3.67
4	上段:0.5mm 下段:0.1mm	0. 25 mm		0.21	4.03

※ 第一期製造条件確認試験で用いた新乾回粉

表 3.5	グリーンペレッ	トの製造条件	(乾式回収粉末の最適化試験)
-------	---------	--------	----------------

試験ラン番号	ラン1	ラン	× 2
ランサイズ	38kgMOX [*]	19kgMOX	19kgMOX
乾式回収粉末の混合率	25wt%	40wt%	40wt%
バインダ添加率	0.5wt%	0.5wt%	0.8wt%
ポアフォーマ添加率	2.1wt%	2.1wt%	1.6wt%
ルブリカント添加率	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%
成型圧力	490MPa	490MPa	490MPa
	成型後4つに分割	棒結加理以降け	成型後4つに分割
備考	熱処理条件は表 3.8	統和処理以降は	熱処理条件は表 3.8
	参照	予約 スコシンコン ロボント	参照

※ 造粒処理は、19kgMOX ずつ実施。

容器分類	容器A	容器 B	容器C	容器 D			
脱脂条件	800℃×2 時間	800℃×2 時間	800℃×2 時間	800℃×4 時間			
中間キープ	なし	なし	1100℃×2 時間	なし			
焼結条件	1700℃×2 時間	1700℃×2 時間	1700℃×2 時間	1700℃×2 時間			
		1回目:170	0℃×2 時間				
		2回目:170	0℃×4時間				
		3回目:170	0℃×4時間				
百禧法冬伊	4 回目:1700℃×4 時間						
丹庞福禾件	5 回目:1700℃×4 時間 6 回目:1700℃×4 時間						
	7回目:1700℃×4時間						
	合計:1700℃×26時間						

表 3.6 熱処理条件(乾式回収粉末の最適化試験)

試験ラン番号		添加剤添加率		造粒処理の結果	
		バインダ	ポアフォーマ	タブレット 厚み	1 パス目収率 (総パス回数)
ラン1	1 容器目	0.5wt%	2.1wt%	2. Omm	37.5% (7 回)
	2 容器目	0.5wt%	2.1wt%	1.8mm	47.2% (4 回)
ラン2	1 容器目	0.5wt%	2.1wt%	1.8mm	23.2% (8 回)
	2 容器目	0.8wt%	1.6wt%	1.6mm	42.5% (7 回)

表 3.7 造粒処理の結果(乾式回収粉末の最適化試験)

計酔与い来旦	密度 (%TD)		
こう ひんしょう しゅう しょう しょう しょう しょう しょう しょう しょう しょう しょう しょ	平均值	標準偏差	
ラン1	57.4	0.284	
(ポアフォーマ:2.1wt%)			
ラン2	61.5	0.196	
(ポアフォーマ: 1.6wt%)			
ラン2	62.8	0 141	
(ポアフォーマ:2.1wt%)	02.0	0.111	
第一期製造条件確認試験 A1	57 1	0.283	
試験の結果(L1CZ0206)*	01.1	0.200	
第一期製造条件確認試験 A1	56.9	0.296	
試験の結果(L1CZ0208) [※]	50.9	0.290	

表3.8 各試験ランのグリーンペレットの密度(乾式回収粉末の最適化試験)

※ 比較用データとして掲載

	試験ラン番号	平均焼結密度	焼結密度の標準偏差
	容器 B (ポアフォーマ無添加) [※]	92.0%TD	0. 194%TD
ラン1	容器 A	77.0%TD	1.35%TD
	容器 B	76.9%TD	1.56%TD
	容器C	79.7%TD	1.35%TD
	容器 D	77.8%TD	1.02%TD
	容器 B (ポアフォーマ無添加)*	87.5%TD	0. 923%TD
ラン2	容器 A	77.0%TD	0.686%TD
	容器 B	77.2%TD	0.641%TD
	容器C	78.3%TD	0.814%TD
	容器 D	76.8%TD	0.595%TD

表 3.9 各試験ランの焼結密度(乾式回収粉末の最適化試験)

※ 粉末を少量分取して無造粒で成型。添加剤はルブリカントのみ 0.7wt%添加。

試験ラ	ン番号	0/M比	Puスポッ ト径(µm)	平均結晶粒 径*(μm)	蒸発性不純物+ 水分(μL/g)	炭素含有 率(ppm)
ラン1	容器A	1.92	95	4.5	173	< 30
	容器 B	1.93	74	4.2	199	< 30
	容器C	1.95	< 20	5.7	92	< 30
	容器D	1.93	75	4.6	161	< 30
	容器A	1.93	98	4.1	218	< 30
ラン2	容器 B	1.92	92	3.6	211	< 30
	容器C	1.93	91	4.6	218	< 30
	容器 D	1.92	95	3.7	227	< 30
燃料仕様		1.94∼ 1.99	≦100	規格なし	≦180	≦300

表3.10 各試験ランの焼結ペレットの主な分析結果(乾式回収粉末の最適化試験)

ポアフォーマ無添加では、ラン1で $9.3\mu m$ 、ラン2で $9.4\mu m$ 。

表 3.11 再焼結 2 時間後の焼結ペレットの分析結果(乾式回収粉末の最適化試験)

	ラン1	ラン2	日桓値
分析項目	容器 D	容器 D	페 (자) 더
0/M 比	1.98	1.98	1.94~1.99
蒸発性不純物量(μL/g)	75	56	$\leq 100^{*}$

※燃料仕様は水分を含めて 180 µ L/g

プルトニウム含有率		24.4wt%
	²³⁸ Pu	1.19wt%
	²³⁹ Pu	63.7wt%
フルトニリム	²⁴⁰ Pu	25.5wt%
1月11上14年11日月又	²⁴¹ Pu	5.02wt%
	²⁴² Pu	4.59wt%
プルトニウム	に対する	42700 ppm
アメリシウム	ふ 含有率	
比発熱	量	3.6W/kgMOX

表 3.12 粉末温度測定に用いた粉末組成



図 2.1 第一期製造条件確認試験に用いた乾式回収粉末の種類と比表面積



図 2.2 主な試験フロー



図 2.3 脱脂・焼結個別処理と脱脂・焼結連続処理の焼結パターンの比較



図 2.4 A3 試験の主な試験フロー(脱脂工程以降)



図 2.5 ポアフォーマ添加率と平均焼結密度(A1 試験)



MACRO

 $500\,\mu$ m

(a) エッチングなし



(b) エッチング後

新乾回粉 25wt%混合
ポアフォーマ添加率 1.6wt%
平均密度 90.9%TD
平均結晶粒径 $5.5 \mu m$

図 2.6 L1CZ0101 の金相写真(A1 試験)



MACRO

 $500 \; \mu \; \mathrm{m}$

(a) エッチング後



(b) エッチング後

新乾回粉 25wt%混合 ポアフォーマ添加率 2.3wt% 平均密度 84.2%TD 平均結晶粒径 1.9μm

図 2.7 L1CZ0108 の金相写真(A1 試験)



MACRO

 $500\,\mu$ m







15µm

(b) エッチング後

旧乾回粉 25wt%混合 ポアフォーマ添加率 2.1wt% 平均密度 84.3 %TD 平均結晶粒径 1.9μm

図 2.8 L1CZ0208 の金相写真(A1 試験)



図 2.9 結晶粒径と蒸発性不純物(A1 試験)



図 2.10 ポアフォーマ添加率と蒸発性不純物(A1 試験)



図 2.11 脱ガス/再焼結又は再焼結による平均焼結密度の変化(A1 試験)



図 2.12(a) 脱ガス/再焼結(1回目)によるペレットごとの焼結密度の変化(A1 試験)



図 2.12(b) 脱ガス/再焼結(2回目)によるペレットごとの焼結密度の変化(A1試験)



図 2.13 グリーンペレットの密度の標準偏差と焼結密度の標準偏差(A1 試験)



図 2.14 添加剤混合 I 工程から造粒工程の処理の概要



図 2.15 ポアフォーマ添加率とグリーンペレットの密度の標準偏差(A1 試験)



図 2.16(b) 乾式回収粉末混合率とグリーンペレットの密度 (A4 試験,外側燃料仕様)










図 2.19 パス毎の良品収率(混合・造粒設備と造粒・整粒設備の比較)



図 2.20 造粒・整粒設備のアンダー品の流れ



図 2.21 A2 試験の焼結ペレットの金相写真(L1CZ0210)



図 2.22 焼結炉ごとの平均焼結密度(A3 試験)



-65-



図 2.24(a) 脱ガス/再焼結による平均焼結密度の変化(A3 試験)



図 2.24(b) 脱ガス/再焼結による焼結密度の標準偏差の変化(A3 試験)











図 2.28 焼結時間と焼結密度のばらつきの関係概略図



図 2.29 低密度ペレット製造に適した乾式回収粉末のイメージ



※エラーバーは標準偏差を示す。

図 3.1 焼きしまり試験の結果 (焼結密度)





図 3.4 L1CZ0208 の直径 4 µ m 以下の気孔数割合の変化(焼きしまり試験)

JAEA-Technology 2008-017



(a) 乾式回収粉末 No.0(新乾回粉) 比表面積 1.07m²/g



(b) 乾式回収粉末 No.1比表面積 0.64m²/g



(c) 乾式回収粉末 No.2比表面積 0.91m²/g



(d) 乾式回収粉末 No.3 比表面積 0.58m²/g



(e) 乾式回収粉末 No.4
 比表面積 0.21m²/g



(f) 旧乾回粉比表面積 0.51m²/g

図 3.5 乾式回収粉末の SEM 写真(乾式回収粉末の最適化試験)



図 3.6 乾式回収粉末の最適化試験の試験フロー



図 3.7 ポアフォーマ添加率と焼結密度の標準偏差 (A1 試験と乾式回収粉末の最適化試験)







図 3.8(b) 再焼結による焼結密度の変化(乾式回収粉末の最適化試験ラン2)



図 3.9 ポアフォーマ無添加の焼結ペレットの金相写真(乾式回収粉末の最適化試験)







図 3.11 乾式回収粉末による密度低下の模式図





再焼結2時間後 (平均結晶粒径 6.0μm)





再焼結 24 時間後 (平均結晶粒径 10.1μm)

図 3.12 焼結ペレットの金相写真 (乾式回収粉末の最適化試験ラン1,容器 D)



図 3.14 乾式回収粉末の混合率と焼きしまりの関係模式図



図 3.15 ラン1の焼結時間を4時間とした場合のポアフォーマ添加率と 焼きしまりの検討(乾式回収粉末の最適化試験)



(第一期製造条件確認試験と乾式回収粉末の最適化試験)







図 3.18 ホッパ内粉末温度の時間変化

工程	A1 試験	A2 試験	A3 試験	A4 試験	A5 試験
种量	原料秤量設備	原料秤量設備	原料秤量設備	原料秤量設備	原料秤量設備
均一化混合	均一化混合設備	均一化混合設備	均一化混合設備	均一化混合設備	均一化混合設備
添加剤混合 I	混合・造粒設備	添加剤混合設備	混合・造粒設備	混合・造粒設備	混合・造粒設備
造粒	混合・造粒設備	造粒・整粒設備	混合・造粒設備	混合・造粒設備	混合・造粒設備
モリント	均一化混合設備	沃加刘润人塾備	均一化混合設備	均一化混合設備	払一亿词へ記備
	又は添加剤混合設備	构态从4月94年 13 度义协制	又は添加剤混合設備	又は添加剤混合設備	
成型	成型設備	成型設備	成型設備	成型設備	成型設備
子備焼結(脱脂)	予備焼結設備	予備焼結設備	2.1、1、本社記/借	予備焼結設備	連続予備焼結・連続
焼結	焿結設備	焿結設備	、、レンド洗売取1曲	焿結設備	焼結設備
密度抜取測定	密度抜取測定設備	密度抜取測定設備	密度抜取測定設備	密度抜取測定設備	密度抜取測定設備
研削・検査	仕上検査設備			仕上検査設備	

付録1 各試験での使用設備一覧

-83-

瓢	
粉末の分析物性測定結果一	の分析物性測定結果(1)
で使用した原料	(混合転換粉末)
第一期製造条件確認試験	-1 プルトニウム原料粉末
付録 2	表 1

	§ -	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C 1	不純作 (ppm)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	\sim 1
Ц	不純物 (ppm)	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
z	不純物 (ppm)	550 <	500 <	530 <	550 <	500 <	540 <	550 <	550 <	580	540 <	540 <	530	460 <	510 <	550 <	520 <	460 <	520 <
U	不純物 (ppm)	60	< 30	70	50	< 30	40	30	60	70	40	100	100	40	40	80	06	70	< 30
	水分さ月 量 (ppm)	2800	3200	3000	3000	2900	2700	2900	3100	3200	3000	3100	3300	3000	2900	2500	1900	1900	2100
	0/MEC	2.32	2.32	2.30	2.26	2.28	2.26	2.27	2.29	2.27	2.28	2.30	2.30	2.30	2.29	2.29	2.30	2.29	2.29
	分析年月日	2004/8/18	2004/10/13	2004/10/26	2004/11/9	2004/12/9	2004/12/3	2005/1/28	2005/2/16	2005/3/9	2005/4/15	2005/5/16	2005/5/24	2005/6/21	2005/7/6	2005/11/24	2005/12/27	2006/1/16	2006/2/1
7 メリシウム	含有率 (ppm)	44, 000	44, 200	43, 100	35, 200	30, 500	30, 900	30, 100	35,800	31, 900	36,000	38, 300	38, 000	31,200	46, 100	33, 200	33,400	35,400	35, 300
U 令	有率 (wt%)	44.41	43.58	44.03	43.69	43.68	43.79	43.85	43.70	43.77	43.94	43.98	43.89	43.80	43.83	43.61	43.57	44.36	44.36
	Pu242 (wt%)	5.27	5.532	5.094	4.306	4.467	4.456	4.588	4.325	4.514	4.321	4.216	4.222	4.608	5.437	4.487	4.487	4.504	4.502
	Pu241 (wt%)	5.577	5.712	5.498	5.485	5.600	5.540	5.831	5.400	5.822	5.359	5.169	5.163	5.736	5.508	5.396	5.369	5.594	5.579
体組成	Pu240 (wt%)	27.234	27. 555	26. 693	24.829	25.073	25.140	25. 159	24.908	25.055	24.913	24.760	24.774	25.169	27.405	25.179	25.176	25.100	25.099
小二ウム同位	Pu239 (wt%)	60.573	59.783	61.401	64.214	63.675	63.683	63.198	64.205	63. 389	64.241	64.740	64.724	63.267	60.262	63.747	63.774	63.585	63.610
J° V	Pu238 (wt%)	1.346	1.418	1.314	1.166	1. 185	1. 181	1.224	1.162	1.220	1. 166	1.115	1.117	1.220	1.388	1.191	1.194	1.217	1.210
	プルトニウ ム含有率 (wt%)	39.48	40.11	39.69	40.85	40.75	40.96	40.61	40.57	40.83	40.57	40.38	40.36	40.70	40.14	40.74	40.82	39.98	39.90
測定項目	日ット番号	L1G10301	L1GZ0001	L1GZ0002	L1GZ0003	L1GZ0004	L1GZ0005	L1GZ0006	L1GZ0007	L1GZ0008	L1GZ0009	L1GZ0010	L1GZ0011	L1GZ0012	L1GZ0013	L1GZ0014	L1GZ0015	L1GZ0016	L1GZ0017

表 1-2 プルトニウム原料粉末(混合転換粉末)の分析物性測定結果(2)

											Ϋ́	純物	分析	結集	₹(pp	(m											式	**	1.73
		В		Cd		Cr	Че	Ni		>	0	à	Mg		Cu		Si	Z	u,	Ag	Mr		Mo	Ъ	q	Sn	面積 (m ² /g		径 µ m)
õ	0	\sim	5	\sim	\sim	50	110	\sim	> 02	50	\sim	30	\sim	15 <	1(> 0	100	\sim	100	< 5	\sim	20 <	50	\sim	30	\sim	30 4.	15 7	. 052
0	0	\sim	5	>	\sim	50	110	~	> 05	50	\sim	30	\sim	15 <	(1(> 0	100	\sim	100	< 5	\sim	20 <	50	\sim	30	~ 3	30 4.4	58 10	. 865
0	0	\sim	Ω	\sim	10	80	250	\sim	50 <	50	\sim	30	\sim	15 <	1	\sim 0	100	\sim	100	\sim 5	\sim	20 <	50	\sim	30	\sim	30 2.9	91 13	. 867
9	0	\sim	О	\sim	10	180	530	\sim	50 <	50	\sim	30	\sim	15 <	1	\sim 0	100	\sim	100	\sim 5	\sim	20 <	50	\sim	30	\sim	30 4.	41 11	. 157
<u> </u>	0	\sim	ۍ ۲	\sim	10	180	630	~	50 <	50	\sim	30	\sim	15 <		\sim 0	100	\sim	100	< 5	\sim	20 <	50	\sim	30	\sim	30 4.	10 12	. 593
<u> </u>	0	\sim	Ω	\sim	10	220	740	\sim	50 <	50	\sim	30	\sim	15 <	1	\sim 0	100	\sim	100	\sim 5	\sim	20 <	50	\sim	30	\sim	30 4. (07 10	. 226
9	0	\sim	2	\sim	10	210	700	\sim	50 <	50	L	40	\sim	15 <	Ĭ	> 0	100	\sim	100	\sim 5	\sim	20 <	50	\sim	30	\sim	30 4.:	37 12	. 769
<u> </u>	00	\sim	Ω.	\sim	10	170	520	\sim	> 02	50	\sim	30	\sim	15 <	Ĭ	\sim 0	100	\sim	100	\sim 5	\sim	20 <	50	\sim	30	\sim	30 4.5	26 10	. 969
	00	\sim	5	\sim	10	260	660	22	> 05	50	\sim	30	\sim	15 <	(1(> 0	100	\sim	100	< 5	\sim	20 <	50	\sim	30	2 >	30 4.	41 6	. 578
	00	\sim	ب م	\sim	10	210	730	21 ~	50 <	50	\sim	30	\sim	15 <	1	\sim 0	100	\sim	100	\sim 5	'	40 <	50	\sim	30	~ ~	30 4.4	56 6	. 500
	00	\sim	2	\sim	10	70	270	\sim	> 02	50	\sim	30	\sim	15 <	1(> 0	100	\sim	100	\sim 5	\sim	20 <	50	\sim	30	\sim	30 4.	45 4	. 326
	00	\sim	ъ ъ	\sim	10	80	260	\sim	50 <	50	\sim	30	\sim	15 <	1	\sim 0	100	\sim	100	\sim 5	\sim	20 <	50	\sim	30	\sim	30 4. 4	41 4	. 627
	00	\sim	Ω	\sim	10	210	740	\sim	50 <	50	\sim	30	\sim	15 <	1	> 0	100	\sim	100	\sim 5	\sim	20 <	50	\sim	30	\sim	30 4.	41 4	. 113
	00	\sim	5	\sim	\sim	50	110	\sim	50 <	50	\sim	30	\sim	15 <	1(> 0	100	\sim	100	< 5	\sim	20 <	50	\sim	30	~	30 4.	49 5	. 710
	00	\sim	٠ ى	\sim	10	370	860	\sim	50 <	50	\sim	30	\sim	15 <	1(\sim 0	100	\sim	100	< 5	\sim	20 <	50	\sim	30	\sim	30 4.:	36 5	. 746
\sim	00	\sim	5	\sim	10	480	970	Ω.	> 05	50	\sim	30	\sim	15 <	1(> 0	100	\sim	100	< 5		20	60	\sim	30	2 >	30 4.3	39 4	. 932
\sim	00	\sim	5	~	5	220	650	~	> 05	20	\sim	30	\sim	15 <	(1(> 0	100	\sim	100	< 5	\sim	20 <	50	\sim	30	~ 3	30 4. (06 5	. 125
<u> </u>	00	\sim	ۍ ۲	\sim	10	210	600	€1 \	50 <	50	\sim	30	\sim	15 <	1(> 0	100	\sim	100	< 5	\sim	20 <	50	\sim	30	\sim	30 4.	17 5	. 059

	U235 含有率 (wt%)	0.18	0.18	0.19	0.17	0.22	0.19	0.22	0.22	0.21	0.21
	タップ 密度 (g/cc)	3.17	3.08	3.08	3.08	3.03	2.99	3.03	3.03	3.17	3.08
	かさ 密度 (g/cc)	2.27	2.22	2.25	2.17	2.15	2.15	2.08	2.08	2.17	2.13
	平均 粒径 (m m)	2.73	3.00	2.74	2.53	2.55	2.54	2.68	2.66	2.67	2.59
ざ結果 (1)	比表 面積 (m ^{²/g)}	2.64	2.42	2.69	2.96	2.98	2.95	2.76	2.74	2.74	2.78
析物性測定	蒸発性 不純物 (µ 1/g)	I	I	I	I	I	I	I	I	1500	I
粉末の分	C 1 不純物 (ppm)	< 2	12	< 2	2	2	2	< 2	< 2	< 2	< 2
ラン原料	F 不純物 (ppm)	3	3	5	9	9	7	4	4	4	5
₹2-1 ウ	N 不純物 (ppm)	20	18	22	17	17	15	4	< 3	< 3	5
₩	C 不純物 (ppm)	20	24	16	16	15	17	22	24	20	22
	0/UEC	2.04	2.04	2.04	2.04	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.04
	U 含有率 (wt%)	87.85	87.87	87.84	87.82	87.82	87.82	87.78	87.77	87.78	87.79
	測定項目ロット番号	L1U00001	L1U00002	L1U00003	L1U00004	L1U00005	L1U00006	L1U00007	L1U00008	L1U00009	L1U00010

表 2-2 ウラン原料粉末の分析物性測定結果(2)

	1										
	Sn (ppm)	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4
	Ľ	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim
	Si ppm)	12	12	12	12	12	12	8	8	8	8
		\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim
	Ni (ppm)	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7	8	8	8	8
	<u> </u>	Ň		,	, N	,		Č1	,	,	Č
	Mo (ppm)	>	~	>	>	>	~ >	>	>	>	~ ~
	Mg (ppm)	$\langle 1 \rangle$	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 3	< 3	< 3	< 3
		2	ß	2	ß	2	2	2	ß	2	2
栗	Fe (ppm)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
結					Н			3	3	3	3
植物分析	Cu (ppm)	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	~
菜		3	3	3	3	3	3	2	ß	ß	വ
¥	Cr (ppm)	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	>	\sim	\sim	\sim	\sim
		. 5	. 5	. 5	. 5	. 5	. 5	. 5	. 5	. 5	. 5
	Cd	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	d d	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim
		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Ca (ppm)	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	
		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	B (ppm)	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
		\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim
	Al (ppm)	5	< 5	5	< 5	< 5	< 5	< 10	< 10	< 10	< 10
		2	2	2	2	2	2	33	8	С	ج
	g m)	0	0	0	0	0	0.	0	0	0	0
	A (pp	× /		、 <i>/</i>	、 <i>/</i>	、 <i>/</i>			、 <i>,</i>	、 <i>/</i>	、,
	<u> </u>	\vdash	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim
測定項目	ロシア	L1U00001	L1U00002	L1U00003	L1U00004	L1U00005	L1U00006	L1U00007	L1U00008	L1U00009	L1U00010

	備考	新乾回粉	新乾回粉	新乾回粉	新乾回粉	新乾回粉	新乾回粉	旧乾回粉	旧乾回粉	旧乾回粉	旧乾回粉	新乾回粉	新乾回粉	旧乾回粉	旧乾回粉
	21不純 物 ^(ppm)	25	17	< 10	23	12	15	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	10
	F 不純(物 (ppm)	25	< 10	< 10	11	10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	10
	N不純 物 ^(ppm)	< 50	< 50	< 50	< 50	50	190	< 50	60	80	80	120	80	< 50	50
	C 不純 物 (ppm)	30	60	50	30	< 30	250	< 30	< 30	< 30	120	50	60	50	45
	水分含 有量 (ppm)	2000	1400	900	800	840	1900	640	860	940	1100	980	810	930	Ι
	0/MEC	2.357	2.34	2.33	2.31	2.31	2.33	2.39	2.36	2.40	2.39	2.34	2.32	2.33	2.35
	分析年月日	2004/10/13	2004/11/1	2004/11/9	2004/12/3	2005/2/10	2005/3/9	2005/1/12	2005/1/28	2005/4/22	2005/6/21	2005/4/19	2005/11/8	2006/5/10	2004/12/3
	7メリシウム 含有率 (ppm)	48,000	48,500	48,300	47, 100	48,800	48, 700	49,200	49,200	50, 900	51,000	47, 300	40,800	38,400	24,600
	ウラン 含有率 (wt%)	57.34	57.45	57.80	59.43	58.20	59.17	59.54	59.93	59.52	59.66	63. 58	58.55	58.01	59.54
	Pu242 (wt%)	4.773	4.806	4.580	4.376	4.465	4.562	4.439	4.380	4.631	4.438	5.112	4.404	4.495	4.203
	Pu241 (wt%)	5.170	5.244	5.025	4.812	4.959	5.006	4.837	4.693	4.628	4.520	5.310	5.093	5.096	6.762
位体組成	Pu240 (wt%)	25.806	25.953	25.492	24.932	24.853	25.146	24.832	24.883	25.044	25.205	26.721	25.062	25.165	24.429
7°ルトニウム同	Pu239 (wt%)	63.008	62.738	63.701	64.745	64.519	64.065	64.747	64.916	64.508	64.733	61.540	64.286	64.075	63.485
	Pu238 (wt%)	1.243	1.259	1.202	1. 135	1.204	1.221	1. 145	1. 128	1. 189	1.104	1.317	1. 155	1. 169	1. 121
	プルトニ ウム含有」 率 (wt%)	26.94	26.82	26.5	25.47	26.47	25.46	25.29	25.04	25.17	25.15	21.27	26.47	26.71	26.15
国行道日	四 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一	L1TZ0001	L1TZ0002	L1TZ0003	L1T20004	L1T20005	L1T20006	L1TZ0007	L1TZ0008	L1TZ0009	L1TZ0010	L1TZ0011	L1T20012	L1T20013	L1T10043

乾式回収粉末の分析物性測定結果
表 3-1

(1)

画完庙日								不離	物分秒	fi結果	dd)	(m										
口ット番号	Al	В	Са	Cd	Cr	Ге	Mg	Ni	Λ	Cu		Si	Zn	Ag	Mr		Mo	Pb	Sn	王 御 (m ³ /g)	粒度分布 ($i $ がな) (μ m)	備考
L1TZ0001	150	< 5	30	>	5 110	(450	15	< 50	< 51	1 > (01	110 <	< 100	2	>	20 <	50	< 30	< 3	0 2.5	1 2.504	新乾回粉
L1TZ0002	100	< 5	30	>	5 60) 280	15	< 50	< 50	1 > (> 01	100 <	< 100	>	\sim	20 <	50	< 30	< 3	0 1. 2	24 5.474	新乾回粉
L1TZ0003	100	< 5	30	>	5 80	(480	15	< 50	< 50	1 > 0	> 01	100 <	< 100	>	\sim	20 <	50	< 30	< 3	0 1. (99 8. 096	新乾回粉
L1TZ0004	260	< 5	30	>	5 110	340	15	< 50	< 50	1 > 1	10	360 <	< 100	>	\sim	20 <	50	< 30	< 3	0 1. (02 6.608	新乾回粉
L1TZ0005	230	< 5	30	>	5 90) 230	15	60	< 50	1 > (10	270 <	< 100	>	\sim	20 <	50	< 30	< 3	0 1.1	9 6.308	新乾回粉
L1TZ0006	230	< 5	30	>	5 100) 240	15	< 50	< 50	1 > 0	10	350 <	< 100	>	\sim	20 <	50	< 30	< 3	0 1. 2	4 5.135	新乾回粉
L1TZ0007	170	< 5	30	>	5 50	100	15	< 50	< 50	1 < 1	10	170	440	\sim	\sim	20 <	50	< 30	< 3	0 0.4	.8 3.461	旧乾回粉
L1TZ0008	280	< 5	30	>	5 80	170	15	160	< 50	1 > 0	> 01	100	180	>	\sim	20 <	50	< 30	< 3	0 0. 5	8 5.651	旧乾回粉
L1TZ0009	240	< 5	30	>	5 50	100	15	< 50	< 50	1 > 1	10	190	210	>	\sim	20 <	50	< 30	< 3	0 0. 5	3 4.799	旧乾回粉
L1TZ0010	190	< 5	30	>	5 50	100	15	< 50	< 50	1 > 0	10	140 <	< 100	\sim	\sim	20 <	50	< 30	< 3	0 0. 5	4.785	旧乾回粉
L1TZ0011	100	< 5	30	>	5 50	150	15	< 50	< 50	1 > 0	> 01	100 <	< 100	>	\sim	20 <	50	< 30	< 3	0 1.1	0 4.170	新乾回粉
L1TZ0012	110	< 5	30	>	5 70) 280	15	< 50	< 50	1 > 0	> 01	100 <	< 100	\sim	\sim	20 <	50	< 30	< 3	0 1.0	7 2.490	新乾回粉
L1TZ0013	110	< 5	< 30	>	5 90	450	< 15	< 50	< 50	1 > 0	> 01	100 <	< 100	\sim	\sim	20 <	50	< 30	< 3	0 0. ε	4 5.966	旧乾回粉
L1T10043	100	< 5	30	3 >	5 50	100	15	< 50	< 50	1 > 0	> 01	100 <	< 100	>	\sim	20 <	50	< 30	< 3	0 0.4	6 6.110	旧乾回粉

表 3-2 乾式回収粉末の分析物性測定結果(2)

	仁相	美値
	外側炉心領域燃料	内側炉心領域燃料
1. 等価フィッサイル富化度	0.213±0.006	0.140 ± 0.005
2. ウラン濃縮度(wt%)	≦0.71	同左
3. 0/M比	$1.97\!+\!0.02\\-0.03$	同左
 4. 蒸発性不純物(水分含む)(µ1/g) 	≦180	同左
5. ペレット密度 (%TD)	85.0±2.0	85.0±2.0
(理論密度:g/cm ³)	(11.02)	(10.98)
6. ペレット外径(mm)	5.40 ± 0.05	同左
7. ペレット高さ(mm) (参考値)	6~10	同左
8. プルト=ウムスポット径(μm)	≦100	同左
	$(100 \text{wt}\% \text{PuO}_2)$	
9. 个純物 (ppm)		
AI	≤ 700	
В	≤ 20	
С	≤ 300	
Cd	≤ 20	
C1	≤ 25	
Cr	≤ 500	
F	≤ 25	同左
Fe	≦1600	
Ν	≦200	
Ni	≤ 500	
V	≤ 500	
Ca+Mg	≦230	
Cu+Si+Zn	≦1400	
Ag+Mn+Mo+Pb+Sn	≦400	
トータル	≦4000	

付録3 「もんじゅ」炉心燃料ペレットの主要仕様値

JAEA-Technology 2008-017

試験ラン 番号	プルトニウム原料粉末 原料ロット番号	ウラン原料粉末 原料ロット番号	乾式回収粉末 原料ロット番号	乾式回収粉末の 混合率(%)	発熱量 (W/kgHM)
L1CZ 0101	L1G10301	L1U00007	L1TZ0001	25	3.92
L1CZ 0102	L1G10301	L1U00007	L1TZ0001	25	3.90
L1CZ 0103	L1G10301, L1GZ0001	L1U00007	L1TZ0001, L1TZ0002	25	3.94
L1CZ 0104	L1GZ0001, L1GZ0002	L1U00007	L1TZ0003	25	3.97
L1CZ 0105	L1GZ0001	L1U00007	L1TZ0002	25	4.07
L1CZ 0106	L1GZ0001	L1U00007	L1TZ0002, L1TZ0003	25	4.06
L1CZ 0107	L1GZ0002	L1U00007, L1U00008	L1TZ0003	25	3.91
L1CZ 0108	L1GZ0002	L1U00008	L1TZ0003	25	3.89
L1CZ 0109	L1GZ0002, L1GZ0013	L1U00008	L1TZ0003	5	4.06
L1CZ 0110	L1GZ0013	L1U00008	L1TZ0003, L1TZ0006	40	3.98
L1CZ 0201	L1GZ0003	L1U00008	L1T10043	25	4.39
L1CZ 0202	L1GZ0003, L1GZ0004	L1U00008	L1T10043	25	4.37
L1CZ 0203	L1GZ0004	L1U00008	L1T10043	25	4.33
L1CZ 0204	L1GZ0004, L1GZ0005	L1U00008	L1T10043, L1TZ0007	25	4.31
L1CZ 0205	L1GZ0005	L1U00008	L1TZ0007	25	4.34
L1CZ 0206	L1GZ0005, L1GZ0006	L1U00008	L1TZ0007	25	4.35
L1CZ 0207	L1GZ0006	L1U00008	L1TZ0007, L1TZ0008	25	4.38
L1CZ 0208	L1GZ0006, L1GZ0007	L1U00008	L1TZ0008	25	4.40
L1CZ 0209	L1GZ0007	L1U00008	L1TZ0008, L1TZ0009	25	4.51
L1CZ 0210	L1GZ0007, L1GZ0008	L1U00008	L1TZ0009	25	4.50
L1CZ 0211	L1GZ0008	L1U00008	L1TZ0009	25	4.47
L1CZ 0212	L1GZ0008, L1GZ0009	L1U00008	L1TZ0009	25	4.49
L1CZ 0213	L1GZ0009, L1GZ0010	L1U00008	L1TZ0004	5	4.44
L1CZ 0214	L1GZ0010	L1U00008	L1TZ0004	15	4.44
L1CZ 0215	L1GZ0010, L1GZ0011	L1U00008	L1TZ0004	40	4.53
L1CZ 0216	L1GZ0011	L1U00008	L1TZ0009, L1TZ0010	25	4.49
L1CZ 0217	L1GZ0011, L1GZ0012	L1U00008	L1TZ0010	25	4.79
L1CZ 0218	L1GZ0012	L1U00008	L1TZ0010	25	4.43
L1CZ 0219	L1GZ0012, L1GZ0014	L1U00008	L1TZ0012	25	4.35
L1CZ 0220	L1GZ0014, L1GZ0015	L1U00008	L1TZ0012	25	4.35
L1CZ 0221	L1GZ0015	L1U00008	L1TZ0016	25	4.38
L1CZ 0222	L1GZ0015, L1GZ0016	L1U00008	L1TZ0016, L1TZ0017	40	4.44

付録4 各試験ランの原料ロット構成と発熱量

各試験ランの主な試験条件一覧	各試験ランの主な試験条件(1)
付録 5	表1

焿結条件	1700°C×2時間	1700°C×2時間	1700°C×2時間	1700°C×2時間	1700°C×2時間	1700°C×2時間	1700°C×2時間	1700°C×2時間	1700°C×2時間	1700°C×2時間	1700°C×2時間	1700°C×2時間	1700°C×2時間	1700°C×2時間	1700°C×2時間	1700°C×2時間	1700°C×2時間	1700°C×2時間
脱脂条件	800°C×2時間	800°C×2時間	800°C×2時間	800°C×2時間	800°C×2時間	800°C×2時間	800°C×2時間	800°C×2時間	800°C×2時間	800°C×2時間	800°C×2時間	800°C×2時間	800°C×2時間	800°C×2時間	800°C×2時間	800°C×2時間	800°C×2時間	800°C×4時間
成型圧力	490Mpa	490Mpa	490Mpa	490Mpa	490Mpa	490Mpa	490Mpa	490Mpa	490Mpa	490Mpa	490Mpa	490Mpa	490Mpa	490Mpa	490Mpa	490Mpa	490Mpa	490Mpa
ルブリカント孫加率	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%	0.2wt%
ポアフォー マ添加率	1.6wt%	2.0wt%	2.3wt%	2.3wt%	2.3wt%	2.3wt%	2.3wt%	2.3wt%	2.3wt%	2.3wt%	2.3wt%	2.0wt%	1.6wt%	2. 0wt%	2.3wt%	2.1wt%	1.6wt%	2.1wt%
バインダ 添加率	0.5wt%	0.5wt%	0.5wt%	0.5wt%	0.5wt%	0.5wt%	0.5wt%	0.5wt%	0.5wt%	0.5wt%	0.5wt%	0.5wt%	0.5wt%	0.5wt%	0.5wt%	0.5wt%	0.5wt%	0.5wt%
乾式回収粉 末混合率	25wt%	25wt%	25wt%	25wt%	25wt%	25wt%	25wt%	25wt%	25wt%	25wt%	25wt%	25wt%	25wt%	25wt%	25wt%	25wt%	25wt%	25wt%
ランサイ ズ	38kgMOX	38kgMOX	38kgMOX	38kgMOX	38kgMOX	$19 kgMOX ^{\pm 1)}$	$19 \mathrm{kgMOX}^{\pm1}$	38kgMOX	$19 kgMOX ^{\pm 1)}$	$19 \mathrm{kgMOX}^{\pm 1)}$	38kgMOX							
試験 ラン番号	L1CZ0101	L1CZ0102	L1CZ0103	L1CZ0104	L1CZ0105	L1CZ0106	L1CZ1106	L1CZ0107	L1CZ0108	L1CZ1108	L1CZ0201	L1CZ0202	L1CZ0203	L1CZ0204	L1CZ0205	L1CZ0206	L1CZ0207	L1CZ0208
試区後分									F <	ΤV								

JAEA-Technology 2008-017

注1) 均一化混合後に試験ランを2分割

今田十日	今日小市					シーンション			
東 四分	可認	ランサイズ	和 末混合率	添加率	ルノノオー マ孫加率	ト添加率	成型圧力	脱脂条件	焿結条件
	L1CZ0109	38kgMOX	5wt%	0.5wt%	2.3wt%	0.2wt%	490Mpa	800°C×2 時間	1700°C×2 時間
	L1CZ0110	38kgMOX	40wt%	0.5wt%	2.3wt%	0.2wt%	490Mpa	800°C×2 時間	1700°C×2 時間
	L1CZ9213	$11 \mathrm{kgMOX} \stackrel{\pm 1)}{=}$	5wt%	0.5wt%	0	0.2wt%	490Mpa	800°C×2 時間	1700°C×2時間
	L1CZ0213	27kgM0X ^{注 1)}	5wt%	0.5wt%	2.1wt%	0.2wt%	490Mpa	800°C×2 時間	1700°C×2 時間
A4	L1CZ9214	$11 \mathrm{kgMOX} \stackrel{\pm 1)}{=}$	15wt%	0.5wt%	0	0.2wt%	490Mpa	800°C×2 時間	1700°C×2 時間
	L1CZ0214	$27 kg MOX $ ^{$\pm 1)$}	15wt%	0.5wt%	2.1wt%	0.2wt%	490Mpa	800°C×2 時間	1700°C×2時間
	L1CZ9215	$11 \mathrm{kgMOX} \stackrel{\pm 1)}{\longrightarrow}$	40wt%	0.5wt%	0	0.2wt%	490Mpa	800°C×2 時間	1700°C×2 時間
	L1CZ0215	$27 kgMOX \stackrel{\pm 1)}{=}$	40wt%	0.5wt%	2.1wt%	0.2wt%	490Mpa	800°C×2 時間	1700°C×2時間
Q V	L1CZ0209	38kgMOX	25wt%	0.5wt%	2.1wt%	0.2wt%	490Mpa	800°C×2 時間	1700°C×2時間
AZ	L1CZ0210	38kgMOX	25wt%	0.5wt%	2.1wt%	0.2wt%	490Mpa	800°C×2 時間	1700°C×2 時間
	L1CZ9216	$9 kgMOX \stackrel{\pm 1}{\cong} 1$	25wt%	0.5wt%	0	0.2wt%	490Mpa	800°C×2 時間	1700°C×2時間
	L1CZ0211	38kgMOX	25wt%	0.5wt%	2.1wt%	0.2wt%	490Mpa	800°C×2 時間	1700°C×2 時間
	L1CZ0212	38kgMOX	25wt%	0.5wt%	2.1wt%	0.2wt%	490Mpa	800°C×2 時間	1700°C×2時間
A3	L1CZ0216	$27 kgMOX \stackrel{\pm 1)}{=}$	25wt%	0.5wt%	2.1wt%	0.2wt%	490Mpa	800°C×2 時間	1700°C×2 時間
	L1CZ0217	38kgMOX	25wt%	0.5wt%	2.1wt%	0.2wt%	490Mpa	800°C×2 時間	1700°C×2 時間
	L1CZ0218	38kgM0X	25wt%	0.5wt%	2.1wt%	0.2wt%	490Mpa	800℃×2 時間	1700°C×2 時間
	L1CZ0219	38kgMOX	25wt%	0.5wt%	2.lwt%	0.2wt%	490Mpa	800°C×4 時間	1700℃×4.3時間
CN	L1CZ0220	38kgMOX	25wt%	0.5wt%	2.1wt%	0.2wt%	490Mpa	800°C×3.4時間	1700℃×3.7時間
							注 江)均一化混合後に試	験ランを分割

表2 各試験ランの主な試験条件(2)

-93-

JAEA-Technology 2008-017

測定項目	Pu含有率	U含有率	D+n+	" 第一一	O/ME	当 第 で が と nd	ر س ا	金相 結晶	7	ケニイル	ム同位体	組成(wt%	(U235 含有率	Am含有率	너 가 나누 나누 시 님 ! 두
試験ラン番号	(wt%)	(wt%)	的 (%1%) (%1%)	フィシサイル 富化度		径(µm) ≦100	濃度	校 (n II)	Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242	(wt%)	(mqq)	計重分析報告日
L1CZ0101	21.74	65.160	86.90	0.1420	1.97 (2.09)*	89	I	5.5	1.313	61.457	26.743	5.381	5.106	0.348	45700	04/12/03
L1CZ0102	21.64	65.420	87.06	0.1410	1.96 (2.10)*	129	39%	3.7	1.311	61.369	26.801	5.393	5.126	0.377	45800	04/12/08
L1CZ0103	21.69	65.420	87.11	0.1410	1.96 (2.11)*	102	39%	1.7	1.323	61.249	26.855	5.427	5.146	0.375	46300	04/12/09
L1CZ0104	21.75	65.370	87.12	0.1410	1.95	94	I	2.2	1.331	61.344	26.782	5.385	5.158	0.279	46500	04/02/09
L1CZ0105	21.77	65.280	87.05	0.1400	1.96	335	33%	2.1	1.369	60.796	27.051	5.485	5.299	0.285	46700	05/02/03
L1CZ0106	21.82	65.140	86.96	0.1410	1.97	551	I	2.0	1.361	60.900	27.009	5.451	5.279	0.271	47600	05/02/17
L1CZ1106	21.82	65.260	87.08	0.1410	1.96	369	31%	2.0	1.366	60.894	27.009	5.455	5.276	0.273	47400	05/02/10
L1CZ0107	21.66	65.410	87.07	0.1410	1.95 (2.15)*	123	49%	1.9	1.281	62.093	26.380	5.289	4.957	0.268	47600	05/02/14
L1CZ0108	21.54	65.510	87.05	0.1400	1.95	222	41%	1.9	1.284	62.127	26.359	5.282	4.948	0.266	47600	05/02/18
L1CZ1108	21.61	65.280	86.89	0.1410	1.97	283	29%	3.9	1.285	62.121	26.363	5.286	4.945	0.266	47400	05/02/14
L1CZ0109	21.89	64.990	86.90	I	1.96	129	31%	1.6	1.323	61.383	26.912	5.195	5.187	0.235	49100	06/03/28
L1CZ0110	21.57	65.490	87.10	0.1410	1.95	125	32%	2.5	1.299	62.153	26.465	5.048	5.035	0.304	49600	06/04/05
L1CZ0201	27.33	59.710	87.04	0.2120	1.96 (2.15)*	125	42%	2.5	1.144	64.424	24.916	5.190	4.327	0.242	39200	05/03/11
L1CZ0202	27.23	59.890	87.12	0.2110	1.94 (2.13)*	82	I	5.2	1.145	64.387	24.945	5.189	4.334	0.240	39500	05/03/10
L1CZ0203	27.51	59.520	87.03	0.2130	1.98 (2.12)*	23	I	4.2	1.156	64.059	25.083	5.269	4.433	0.243	36400	05/03/29
L1CZ0204	27.49	59.390	86.88	0.2130	1.98	91	I	8.6	1.158	64.029	25.088	5.281	4.444	0.244	35800	05/04/05
L1CZ0205	27.48	59.460	86.94	0.2130	1.96 (2.15)*	172	46%	2.8	1.170	63.991	25.097	5.284	4.458	0.258	36100	05/04/25
L1CZ0206	27.58	59.530	87.11	0.2130	1.96 (2.14)*	126	48%	2.4	1.184	63.844	25.105	5.371	4.496	0.261	35700	05/04/14
L1CZ0207	27.62	59.470	87.09	0.2140	1.97	76	I	4.0	1.200	63.635	25.108	5.509	4.548	0.263	35100	05/04/11
L1CZ0208	27.57	59.570	87.14	0.2140	1.96	188	55%	2.9	1.175	64.010	25.013	5.357	4.445	0.256	37200	05/04/15
L1CZ0209	27.37	59.340	86.71	0.2130	1.97	79	I	4.6	1.157	64.442	24.990	5.021	4.390	0.258	42100	06/01/19
L1CZ0210	27.45	59.350	86.80	0.2140	1.97	77	Ι	3.6	1.181	64.129	25.052	5.162	4.476	0.267	40200	06/01/19
ささせ モイ・	1 10 222-443	+ #														

付録6 焼結ペレットの分析結果一覧 表1 焼結ペレットの分析結果(1)

*()内の値は脱脂後ペレットを表す

JAEA-Technology 2008-017

測定項目	P11全有率	11令有率	∩+nd	。 他	4HW/O	Fuスボ 測点	1 2 hil	金相		パルトニウ.	ム同位体	組成(wt%		11935 全有率	Am会有率	
試験ラン番号	(wt%)	(wt%)	仓有举 (wt%)	フィッサイル 富化度		径(µm) ≤100	濃度	整型 (n m)	Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242	(wt%)	(udd)	計量分析報告日
L1CZ0211	27.52	59.22	86.74	0.2140	1.95 (2.12)*	105	37%	I	1.197	63.795	25.107	5.353	4.548	0.284	38300	05/12/15
L1CZ0212	27.48	59.35	86.83	0.21	1.96 (2.13)*	126	42%	I	1.170	64.213	25.026	5.142	4.449	0.254	40500	05/12/19
L1CZ0213	27.46	59.440	86.90	0.2140	1.96	93	ı	2.7	1.152	64.473	24.937	5.120	4.318	0.275	39900	06/01/16
L1CZ0214	27.49	59.500	86.99	0.2150	1.96	73	1	3.4	1.114	64.828	24.837	4.963	4.258	0.326	41900	06/01/16
L1CZ0215	27.45	59.610	87.06	0.2150	1.96	75	ı	4.0	1.121	64.837	24.871	4.883	4.288	0.461	44100	05/12/13
L1CZ0216	27.45	59.510	86.96	0.2140	1.96 (2.10)*	89	I	3.7	1.120	64.790	24.897	4.877	4.316	0.280	43100	06/02/21
L1CZ0217	27.54	59.330	86.90	0.2140	1.93 (2.12)*	160	40%	I	1.169	63.974	25.168	5.172	4.517	0.257	39500	06/04/21
L1CZ0218	27.38	59.450	86.80	0.2120	1.96	26	1	2.7	1.183	63.713	25.271	5.240	4.593	0.253	38400	06/05/01
L1CZ0219	27.50	59.350	86.85	0.2140	1.97 (2.13)*	204	46%	5.9	1.183	63.922	25.167	5.252	4.476	0.242	35700	06/03/07
L1CZ0220	27.43	59.370	86.80	0.2140	1.987 (2.12)*	187	29%	3.8	1.184	63.936	25.167	5.243	4.470	0.241	35900	06/03/16
*()内の値は脱	開後ペレット	を表す														

C
、の分析結果
焼結ペワシ
表1

 \sim

-95-

					_	_	_			_	_	_	_							_		_	_	
	+Με 230	45	55	45	45	45	45	45	60	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	
	IIV G	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	
	n+M -Sn 00	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	
	+Mr -Pb+ ≦40																							
	Ag 0+	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	
	-Si+ n 400	220	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	330	210	210	210	210	210	210	
	Cur ≥ 2	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	
	c.	001	100	100	001	100	100	100	001	100	100	100	100	001	001	001	100	100	001	100	100	100	100	
	Zı																~	~					\sim	
	, 00	50	50	50	50	50	50	50	20	50	50	50	50	20	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
		\sim	\sim	\sim	>	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	
	'n	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
	01	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	~	\sim	\sim	\sim	\sim	~	\sim	\sim	\sim	~	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	
	55	110	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	22C	100	100	100	100	100	100	
Шd	01		\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	>	\sim	\sim	\sim	\sim	>	\sim	\sim		\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	
Ľ; pi	h	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
单位	ц	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	
	Ni 500	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
₩	VI	\sim	\sim	\sim	> (\sim (> (> (> (\sim (> (\sim (> (> (\sim	\sim	> (> (> (\sim (> (> (\sim	
結	Mo	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
分析		> 0	\sim 0	\sim 0	> 0	$^{\vee}$ 0	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0	$^{\vee}$ 0	> 0	> 0	> 0	\sim 0	> 0	> 0	> 0	$^{\vee}$ 0	> 0	$^{\vee}$ 0	\sim 0	
光	Mn	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
勿分	20	15 <	15 <	15 <	15 <	15 <	15 <	15 <	30 <	15 <	15 <	15 <	15 <	15 <	15 <	15 <	15 <	15 <	15 <	15 <	15 <	15 <	15 <	
純	$\widetilde{\mathbb{M}} \widetilde{\mathbb{M}}$	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim		\sim	\sim	\sim	\sim	~	~	\sim	\sim	~	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	
ĸ	00	40	00	00	• 00	00	00	30	20	• 00	40	• 00	• 00	00	50	00	• 00	00	00	60	50	00	• 00	
	∏5 16	~~ ~~ ~~ ~~ ~~ ~~ ~~ ~~ ~~ ~~ ~~ ~~ ~~			-		1	1	1		1		1	1	1	-	1	. 1	1		1	1	-	
		10	10 <	10 <	10 <	10 <	10 <	10	10	10 <	10	10 <	10 <	10 <	10	10	10 <	10 <	10 <	10	10	10 <	10 <	
	ü	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	$\overline{}$	\sim	\sim	\sim	
	r 00	90	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	60	50	50	50	50	50	50	
	0 Q		~	~												~								
	d 20	2	5.	5	2 °	5	5	5	ç	ŝ	5	5	2 °	ç	5	5. V	5	5	ç	5	5	5	5	
	O VII	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	
	Ca ≦80	30	4C	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
	0	~ 2	LC LC	10	> 2	> 2	> 2	> 2	> c	5	> 2	≥ 2	> 2	> 2	~ 5	~ 2	> 2	> 2	> 2	≥ 2	> 2	> 2	≥ 2	
	ш ∑ С	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	
	1 00.	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	170	100	100	100	100	100	110	100	100	100	100	
	A 7∏	~	~	~	\sim	\sim	\sim	\sim	~	\sim	\sim	\sim		~		~	\sim			\sim	\sim	\sim	\sim	
	1g	5	5	5	5	2	5	5	2	5	5	5	5	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	1	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	> (\sim	\sim	~ 6	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	> ($\sim \epsilon$	\sim	\sim 1	> 6	\sim	\sim	
発減+	(分) 1/g) 180	3(51	146	153	91	10(8]	108	159	32	171	113	132	99	55	3(149	142	9	139	111	52	
蒸不	₹ <u>₹</u> \	\sim															\sim							
21千 起物 2000		10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
落 (m) 200 ≤2		> 0	~ 0	\sim 0	> 0	$^{\vee}$ 0	> 0	> 0	> 0	$^{>}0$	$^{>}0$	$^{\vee}$ 0	> 0	> 0	~ 0	~ 0	> 0	> 0	> 0	$^{\vee}$ 0	> 0	> 0	~ 0	
		1	Ē	Ē	1	Ē	1	1	1	Ξ	ī	Ē	1	1	Ē	Ē	1	1	1	Ē	1	1	Ξ	
¥.	<u>d</u> vi																							
v∠ #	8 fi 8	> 0	0	0	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0	~ 0	> 0	> 0	> 0	> 0	~ 0	~	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0	~ 0	+
N 撑	iqq) ≦2	~ 21	22	22	\sim	\sim	\sim	\sim	~ 5	22	ω ×	\sim	\sim	9	ſĊ	21 2	~	< 5	ŝ	\sim	~	~ 5	\sim	を表
極	<u> </u>	30	30 30	50 0)*	30	30	30	30	30 0)*	30	30	30	30	30 0)*	30 0)*	30 30	30	30 0)*	30 0)*	30	30	40	30	1
「えん」	opm, ≦30(1050	(96	1020					101					107	1150	1050		1080	(951					3
5		~	\sim		\sim	\sim	\sim	\sim			\sim	\sim	\sim	\sim	~	~	\sim	>	\sim	\sim	\sim		\sim	詣後
Ш	TID	1	2	3	4	2	9	9	7	8	8	6	0	1	5	3	4	5	9	7	8	6	0	ま脱洗
通	淹	010	010	010	010	010;	010	110	010	010	110	010	0114	020	020:	020	020	020;	020	020	020	020	0214	値
测定		1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	1CZ	Д 0
	影影	L	Г	Г	Г		Г	Γ	Γ	Г	Г		Γ	Γ	Г	Г	Г	L	Γ		Г	Γ	Γ	0 *

表2 焼結ペレットの分析結果(2)
						_						
	a+Mg ≦230	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	
	U C	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	ł
	g+Mn+N 5+Pb+Sr ≦400	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	
	A + C	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	
	Cu+Si- Zn ≤1400	< 210	< 210	< 210	< 210	< 210	< 210	< 210	< 210	< 210	< 210	
	Zn	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
	V ≦500	50 <	50 <	50 <	50 <	50 <	50 <	50 <	50 <	50 <	50 <	
	Sn	< 30 <	< 30 <	< 30 <	< 30 <	< 30 <	< 30 <	< 30 <	< 30 <	< 30 <	< 30 <	
		00	> 0(° 0	Õ	ò	0	> 0()0) O	· 0	ŀ
шd	Si	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 1(< 10	< 10	
i位;p	Pb	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	
漸	Ni ≦500	50	20	50	50	50	50	20	50	50	50	ľ
₹	VII	\sim	\sim (\sim (\sim (\sim	\sim (\sim (\sim	\sim	\sim (ŀ
祈結	Mo	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	
计光分	Mn	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	
純物	Mg ≦150	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	ſ
К	00	• 0C	• 0C	•	, O	ò	0	• 0C	• 0C	0	• 0	ľ
	Fe ≦16	< 1	1	28	14	18	< 10	< 1	< 1	25	31	
	Cu	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	
	≤ 500	< 50	< 50	100	< 50	60	< 50	< 50	< 50	< 50	60	
	Cd ≦20	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
	0 1	\sim (> (\sim	\sim	\sim	\sim	> (\sim	\sim	\sim	
	Ca ≦80	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30	< 3(< 30	< 30	
	B ≦ 20	< 5	c 5	< 5	< 5	< 5	c 5	< 5	< 5	< 5	< 5	
	Al ≦700	140	100	100	120	160	110	100	100	100	100	Ì
	Ag	5	5	> 9	5	5	5	5	> 2	5 <	5 <	
lill a	0.0	> 0	> 6	\sim	\sim	\sim	~	\sim	\sim	~	\sim	ŀ
蒸不 発純+	水分 (µ1/g ≦180	11	17	134	45	85	73	125	161	52	103	
答 CI 为	(ppm) ≦200	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	
日不純物	(ppm) ≦200	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
NA 拒物 [200]		50 <	50 <	50 <	50 <	50 <	50 <	50 <	50 <	50 <	50 <	단表す
R	<u> </u>	× %	00 *	> 0	> 0	> 0	× *	×	\geq 0	× %	× %	12
C 不 約 次	C不純物 ^(ppm) ≦300) (1190)	< 3	< 3	< 3	< 5 (1210)	(1220)	< 3	< (1010)	$^{(1080)}$	脂後ペレジ
	TIL		~	~	1			2	~	<u> </u>	_	「肥」
測定項目	試験ラン番毛	L1CZ0211	L1CZ0215	L1CZ0215	L1CZ0214	L1CZ0215	L1CZ0216	L1CZ0217	L1CZ0215	L1CZ0215	L1CZ0220	* ()内の値()

表2 焼結ペレットの分析結果(2)

This is a blank page.

表1.SI 基本単位	
------------	--

甘木县	SI 基本i	SI 基本単位				
巫平里	名称	記号				
長	さメートル	m				
質量	量キログラム	kg				
時 『	間 秒	S				
電	流アンペア	А				
熱力学温度	度ケルビン	Κ				
物質量	量モ ル	mo1				
光月	度カンデラ	cd				

组合量	SI 基本単位				
和立里	名称	記号			
面 積	平方メートル	m ²			
体積	立法メートル	m ³			
速 さ , 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)	キログラム毎立法メートル	kg/m^3			
質量体積(比体積)	立法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			
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	$mo1/m^3$			
輝 度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2			
屈 折 率	(数 の) 1	1			

表 5. SI 接頭語										
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号					
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d					
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с					
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m					
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ					
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n					
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р					
10^{6}	メガ	Μ	10^{-15}	フェムト	f					
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	а					
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	Z					
10^{1}	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	v					

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

	51 租立单位						
組立量	名称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による			
			表し万	表し万			
平 面 角	ラジアン ^(a)	rad		$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$			
立 体 角	ステラジアン ^(a)	$sr^{(c)}$		$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$			
周 波 数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹			
力	ニュートン	Ν		$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-2}$			
圧力,応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$			
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$			
工 率 , 放射 束	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$			
電荷, 電気量	クーロン	С		s•A			
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$			
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$			
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$			
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$			
磁東	ウエーバ	Wb	V•s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$			
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$			
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$			
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K			
光東	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$			
照度	ルクス	1x	1m/m^2	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$			
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹			
吸収線量, 質量エネル	H L I	Crr	T /lra	22			
ギー分与, カーマ		Gy	J/Kg	m•s			
線量当量,周辺線量当			6				
量,方向性線量当量,個	シーベルト	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$			
人線量当量,組織線量当				l			

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。
 (b)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"1"は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

		衣4.	. 半世	LUT	- Y -	回伯の	白小こ	-2074	<u> 田</u> 4	ノ記方を召せ	531祖立单位07例
和文書						SI 組立単位					
_	Я	꼬. 가. 耳	4				名称			記号	SI 基本単位による表し方
粘					度	パス	、力	ル	秒	Pa•s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力	のモ	-	メ	\sim	ŀ	ニュー	・トン	メー	トル	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表	面		張		力	ニュー	トン毎	ミメー	トル	N/m	kg $\cdot s^{-2}$
角		速			度	ラジ	7:	ン毎	: 秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角	加		速		度	ラジフ	アン有	₩ 平 ⊅	方 秒	rad/s^2	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱	流密度	,	放 射	照	度	ワット	毎平方	メー	トル	W/m^2	kg \cdot s ⁻³
熱	容量,	エン	トロ	ιĽ	ļ	ジュー	・ル毎	ケル	ビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質	量熱容量	: (比	熱容	:量)	,	ジュー	ル毎キ	ログ	ラム	T/(1-K)	2 -2 -2 -1
質	量 エ .	ント	· D	F	1	毎ケル	ビン			J/ (Kg • K)	m•s•K
質	量 エ	ネ	N	ギ	ļ		ルケキ	, n h	= 1	т /1	2 -2 -1
(比エノ	ネ ル	/ ギ)	21-	ルサイ	- 11 - 2	14	J/Kg	m•s•K
勑	伝		道		굻	ワット	毎メー	・トル	毎ケ	W/(m•K)	
5753	14		- -		4.	ルビン				w/ (III · IX)	m·kg·s·k
休	穑 工	ネ	ル	ギ	Į	ジュー	ル毎立	方メ	ート	T/m^3	m^{-1} · kg · g^{-2}
14-	1,8	. 1.		`		ル				J/ III	iii · Kg · S
電	界	の	強	i	さ	ボルー	卜毎>	~	トル	V/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} \cdot \mathbf{A}^{-1}$
体	秸		雷		荷	クーロ	ン毎立	方メ	ート	C/m^3	m ⁻³ • s • A
					1.4	ル				07 11	111 5 A
雷	気		変		位	クーロ	ン毎平	方メ	ート	C/m^2	m ⁻² • s • A
HE I	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	_	2		1.11.	ル				0/11	
誘		電			率	ファラ	ド毎	メー	トル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透		磁			率	ヘンリ	一毎	メー	トル	H/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-2} \cdot \mathbf{A}^{-2}$
モ	ルエ	ネ	ル	ギ	1	ジュ	- <i>N</i>	每日	Εル	J/mo1	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mo1^{-1}$
モ	ルエン	/ ト	다 만	<u>_</u>	,	ジュー	ル毎モ	ル毎	ケル	I/(mo1 ⋅ K)	$m^2 \cdot k\sigma \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モ	<i>I</i> V	烈	谷		量	ピン				5, (moi m)	in Kg 5 K mor
照	射線量(X 線	及び	γ線)	クーロ	ン毎キ	ーログ	ラム	C/kg	kg ⁻¹ • s • A
吸	収	緑	量		率	クレ	1		秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放	射		強		度	ワット	毎ステ	ラジ	アン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放	射		輝		度	ワット:	毎平方 ラジア	メー	トル	$W/(m^2 \cdot sr)$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	0	$1^{\circ} = (\pi / 180)$ rad
分	,	1' = $(1/60)^{\circ}$ = $(\pi/10800)$ rad
秒	"	1" = $(1/60)$ ' = $(\pi/648000)$ rad
リットル	1, L	$11=1 \text{ dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	В	$1B=(1/2)\ln 10(Np)$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で 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 単位であらわされる数値						
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J						
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg						
天 文 単 位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m						

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と

併用されるその他の単位								
名称	記号	SI 単位であらわされる数値						
海 里		1 海里=1852m						
ノット		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s						
アール	a	$1 \text{ a=} 1 \text{ dam}^2 = 10^2 \text{m}^2$						
ヘクタール	ha	$1 \text{ ha}=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{m}^2$						
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa						
オングストローム	Å	1 Å=0. 1nm=10 ⁻¹⁰ m						
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{m}^2$						

表9 固有の名称を含むCGS組立単位

	衣9. 固有の名称を含む65組立単位									
	名称		記号	SI 単位であらわされる数値						
工	ル	グ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J						
ダ	イ	\sim	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N						
ポ	T	ズ	Р	1 P=1 dyn⋅s/cm²=0.1Pa・s						
ス	トーク	ス	St	1 St =1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s						
ガ	ウ	ス	G	1 G ≙10 ⁻⁴ T						
工	ルステッ	F	0e	1 Oe ≙(1000/4π)A/m						
\checkmark	クスウェ	N	Mx	1 Mx ≙10 ⁻⁸ Wb						
ス	チル	ブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd/cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$						
朩		ŀ	ph	1 ph=10 ⁴ 1x						
ガ		\mathcal{N}	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$						

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例					
名称				記号	SI 単位であらわされる数値
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	ン	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			F	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\boldsymbol{\nu}$			Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
Х	線	単	位		1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガ		ン	7	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9}T$
ジ	ヤン	/ ス キ	-	Jy	$1 \text{ Jy}=10^{-26} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$
フ	I.	ル	111		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット					1 metric carat = 200 mg = 2×10^{-4} kg
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大 気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	D	IJ	-	cal	
Ξ	ク	П	\sim	μ	$1 \ \mu = 1 \ \mu m = 10^{-6} m$

а а

s s

.

≂ €

8