



MK- 初装荷燃料ペレット 製造実績と開発成果

茅野 雅志

東海事業所 プルトニウム燃料センター 製造加工部

Results of Current Fabrication Technology Developments and MOX Fuel Fabrication for “JOYO” MK- Initial Load Fuel

Masashi KAYANO

Plutonium Fuel Fabrication Division, Plutonium Fuel Center, Tokai Works

プルトニウム燃料第三開発室ペレット製造工程では燃料製造を通じてFBR燃料製造技術の開発を行っている。1995年から2000年にかけては処理能力の向上を目的に、老朽化設備の大幅な更新、改造、補修作業等を実施した。

「常陽」MK-III初装荷炉心燃料ペレット製造はこれらの大幅な更新後、初めての燃料製造であり、本燃料製造を通じて設備性能の評価を行った。

本燃料製造は計画期間内で終了できたこと、また前回燃料製造よりも高いペレット製造収率を得ることができたことから、大幅な更新によるペレット製造工程の設備性能向上が確認できた。また、設備能力向上により、ペレット製造工程の短縮も図ることができた。

更に、本燃料製造期間中にISO9001品質保証システムの認証を取得し、品質保証体制の強化を図った。

In the Plutonium Fuel Production Facility (PFPF), MOX fuel fabrication technologies have been developed and demonstrated through MOX fuels fabrication for Experimental Fast Reactor “JOYO” and Prototype FBR MONJU since 1988. From 1995 to 2000, replacement, modification and repair works for process equipment were conducted to improve performance of the MOX pellet fabrication process in PFPF as scheduled shut-down maintenance.

Because the MOX fuel fabrication for “JOYO” MK-III initial load fuels was the first fuel fabrication after these major maintenance works, the performance of the MOX pellet fabrication process in PFPF was evaluated through this fuel fabrication experience.

This MOX fuel fabrication was completed within the scheduled period and showed higher yield of product MOX pellets than before. Therefore, the performance of the MOX pellet fabrication process in PFPF was improved by this maintenance work.

Furthermore, the quality assurance system for MOX fuel fabrication was strengthened by acquisition of ISO9001 certificate in 2002.

キーワード

高速実験炉，常陽，MK-III，MOX燃料製造，技術開発，製造設備，更新，ペレット，ISO9001

Experimental Fast Reactor, JOYO, MK-III, MOX Fuel Fabrication, Technology Development, Process Equipment, Replacement, Pellet, ISO9001



茅野 雅志

製造第一課所属
副主任技術員
FBR燃料製造に関
する生産管理及び
品質管理に従事
核燃料取扱主任者
第一種放射線取扱
主任者

1. はじめに

プルトニウム燃料第三開発室においては1987年施設完成後、高速実験炉「常陽」、高速増殖原型炉「もんじゅ」に供給するMOX燃料の製造を行いつつ、FBR燃料の製造技術の開発を行っている。「常陽」MK- 移行炉心燃料製造（以下「前回燃料製造」）終了後の1995年から2000年にかけては、燃料製造と並行しては実施できない保管搬送設備の更

新や大規模なペレット製造工程設備の新設及び補修（以下「新設等」）を行った。（表1参照）

「常陽」MK-Ⅲ初装荷燃料ペレット製造（以下「本燃料製造」）は、これら工程設備の大幅な新設等実施後、初めての燃料製造であり、本燃料製造を通じて、これら新設等を行った設備の性能評価を行った。

また、本燃料製造の開始時にISO 9001品質保証システムの認証を取得し、品質保証体制のより一層の強化を図った。

以下、本燃料製造の実績、設備新設等の開発成果について述べる。

2. ペレット製造実績

2.1 ペレット製造方法

本燃料製造は、図1に示す製造フローで行った。また、製造した燃料ペレットの仕様は表2に示す通りである。ペレット製造工程における処理の概要を以下に記す。

(1) 秤量

本燃料製造で使用した原料粉末は、東海再処理センターで再処理、回収された硝酸プルトニウムを硝酸ウラニル（ ^{235}U 濃縮度約18wt. %）とPu:U = 1:1の割合で混合転換した混合酸化物粉末（MH-MOX粉末）、 UO_2 粉末（ ^{235}U 濃縮度約18wt. %）及び製造工程で発生したスクラップ燃料ペレットを回収処理した乾式回収粉末であり、ペレット中の核分裂性プルトニウムが所定の富化度になるよ

うに、これらの原料粉末を秤り取った。なお、乾式回収粉末は製品ペレット中の割合として25wt. %となる量を混合した。

(2) 均一化混合

焼結後のペレット中のプルトニウム濃度が高い部分（以下「プルトニウムスポット」）の発生を抑

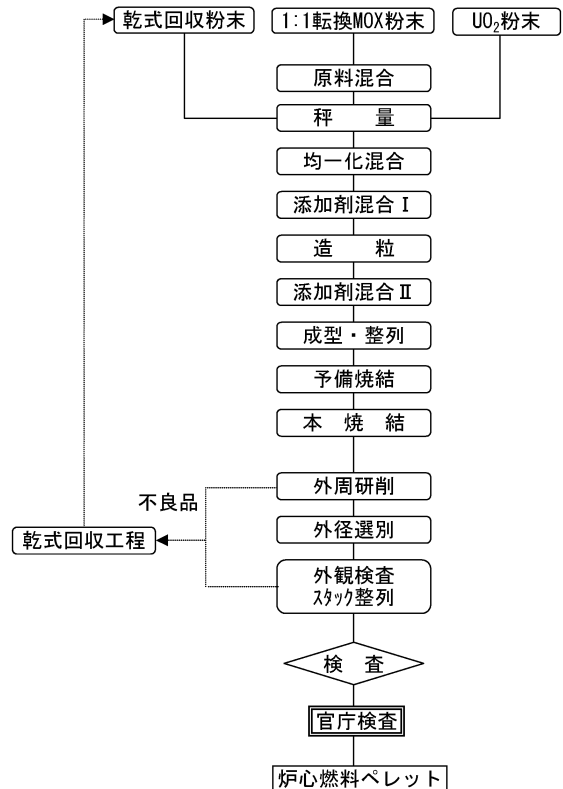


図1 第三開発室ペレット製造フローシート

表1 「常陽」燃料製造に関する経緯

項目	年 度						
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
「常陽」MK-Ⅲ移行炉心 燃料ペレット製造 (前回燃料製造)		■					
設備新設及び補修 (★導入時期, □試験調整期間)		★ □				★ □	
保管搬送設備の更新			■	■	■		
「常陽」MK-Ⅲ初装荷炉心 燃料ペレット製造 (本燃料製造)					先行試験 ■ 本格製造 ■		■
ISO9001品質システム導入						☆運用開始 認証取得☆	

表2 「常陽」燃料ペレット製造仕様

項目	仕様	備考
1 分裂性Pu 富化度 ・ 外側燃料 ・ 内側燃料	20.5 ± 0.7wt. % 16.3 ± 0.7wt. %	
2 ウラン濃縮度	18.4 ± 0.8wt. %	
3 プルトニウムスポット径 ()内は濃度	100 μm (100wt. %以下)	濃度については 100 μmを超えた 場合に測定
4 O/M比	1.97 ± 0.02, - 0.03	
5 不純物(単位は ppm) Al B C Ca Cd Cl Cr F Fe Mg N Ni V Cu+Si+Zn Ag+Mn+Mo+Pb+Sn 合計	700 20 300 80 20 25 500 25 1,600 150 200 500 500 1,400 400 4000ppm以下	
6 蒸発性不純物	150 μL/g (PuO ₂ +UO ₂)以下	
7 水分含有率	30ppm以下	
8 プルトニウム・ウラン含有率	86.7wt. %以上	
9 密度	94 ± 2.0% TD	TD:理論密度 (g/cm ³) 外側燃料 11.03g/cm ³ 内側燃料 11.00g/cm ³
10 寸法 / 形状 ペレット直径	4.63 ± 0.05mm	

えるため、秤量後の粉末をボールミルで機械的に粉砕・混合し、プルトニウムとウランの均一化を図った。

(3) 添加剤混合

添加剤混合は、造粒前に添加剤を混合する工程(添加剤混合)、成型前に添加剤を混合する工程(添加剤混合)の二つに分かれる。添加剤混合では、粉末の造粒性を高めるための結合剤(バインダー)及び焼結後のペレットの密度を所定の密度まで低下させるための密度降下剤(ポアフォーマ)を添加、混合した。また添加剤混合では、成型時の粉末と金型の摩擦をやわらげ、ペレットに割れや傷が発生するのを防止するための潤滑剤を添加、混合した。

(4) 造粒

成型金型への粉末の充填性を高めるために、均一化混合後の流動性の悪い粉末をロータリープレスを用いてタブレット状に成型し、これを砕くことで流動性の良い顆粒にした。

(5) 成型

成型では、造粒後の粉末をレシプロ式の成型機で所定の大きさの円柱(グリーンペレット)に加圧成型した。

(6) 焼結

焼結は、予備焼結、本焼結の二つに分かれる。まず予備焼結でグリーンペレット中のバインダー等の添加剤を800℃で加熱分解し除去した。次に本焼結において1,700℃の高温で焼き固め、所定のペレット密度とした。予備焼結及び本焼結雰囲気にはアルゴンと水素の混合ガス(アルゴン95%、水素5%)を使用した。

(7) 外周研削、外径密度検査

焼結後のペレットは、外径を仕様寸法にするためセンタレスグラインダを使用し、乾式研削した。研削後のペレットについては寸法、密度、外観を検査した。

2.2 ペレット製造実績

(1) 製造期間及び製造量

図2に製造実績を示す。本燃料製造は2000年11月～2002年2月にかけて実施し、計画期間内で終了した。本燃料製造期間に製造した燃料ペレットは約502,000個であり、集合体換算で約64体分である。このうち約39体分がプルトニウムフィッサイル富化度の高い外側炉心用、約25体分がプルトニウムフィッサイル富化度の低い内側炉心用である。なお、これらの富化度の異なる燃料製造の切り替わり時期には設備内の清掃作業を行ない、富

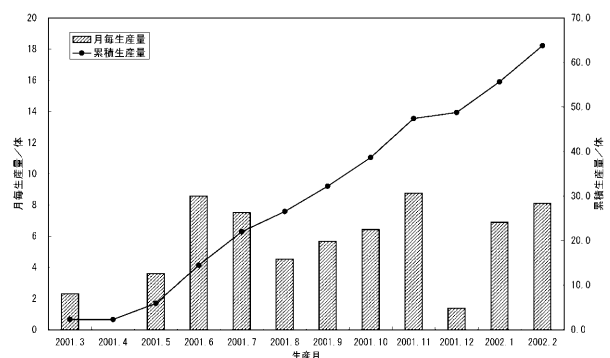


図2 燃料ペレットの製造実績(集合体換算)

化度の異なる粉末やペレットが次期の製品ペレットへ混入するのを防止した。

(2) 製造収率

図3に示すようにペレット製造収率（累積製品重量／累積秤量重量）は、製造開始当初はペレットの焼結密度が仕様上限値（96%TD）を超えるなど、不良品が多発したことにより低かった。また、製造後半には設備故障による不純物混入や規格外のプルトニウムスポットによるロットアウトの発生により、5%程度の製造収率の低下が見られた。しかし、処理を行いつつ成型条件や焼結条件等の製造条件を最適化することで次第にペレット製造収率が上昇し、最終的には約83%と前回燃料製造の約76%を上回ることができ、更新等を行った設備により安定した燃料ペレット製造が可能であることが確認できた。更に、不具合等により不純物が製品に混入しない構造やプルトニウムスポットの発生がより起こりにくい粉碎混合性を高めた設備等を開発することで、ロットアウトの発生を抑えることができ、ペレット製造収率を約90%に高めることができると見込まれる。

(3) ペレットの品質

本燃料製造期間中に製造したペレット断面のアルファオートラジオグラフ及び金相写真の代表例を写真1、写真2に示す。アルファオートラジオグラフはペレット中のプルトニウムスポットを観察するものであり、写真中に黒く写る。プルトニウムスポットについては、本燃料製造期間中に処理した38ロット中1ロットが規格外となった以外は規格（直径100 μ m以下）を超える大きなものは観察されなかった。また、金相写真ではボアフォーム添加により生じた空孔がほぼ均一に分布しており、均質なペレットであることが確認できた。また、製造したペレットの物性値の測定結果については、プルトニウムフィッサイル富化度はほぼ仕

様の中心値（外側炉心用ペレットは仕様 20.5 ± 0.7 wt.%に対して 20.43 ± 0.04 wt.%、内側炉心用ペレットは仕様 16.3 ± 0.7 wt.%に対して 16.25 ± 0.09 wt.%）であり、また、不純物も仕様に対し十分低い値を示すなど、すべて仕様を満足していた。

(4) ペレット製造工程処理能力

本燃料製造では約8.5ヶ月の製造期間で約64体分の燃料ペレットを製造した。月ごとの処理能力は平均約5.4ロット／月であり、また最多の処理を行った月では8ロットであった。本燃料製造での運転体制から考慮すると処理速度は7ロット／月であり、安定してこの処理速度を満足することはできなかった。原因としてはセンサー異常や粉末噛み込みによる設備動作不良等により稼働率が悪かったことが挙げられ、安定操業のためには、よ

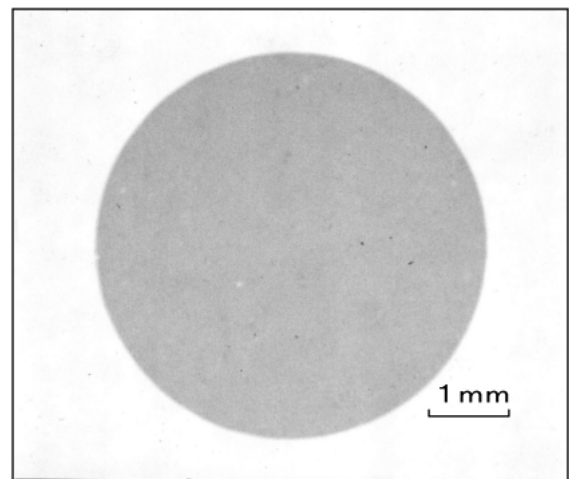


写真1 ペレット断面のアルファオートラジオグラフ

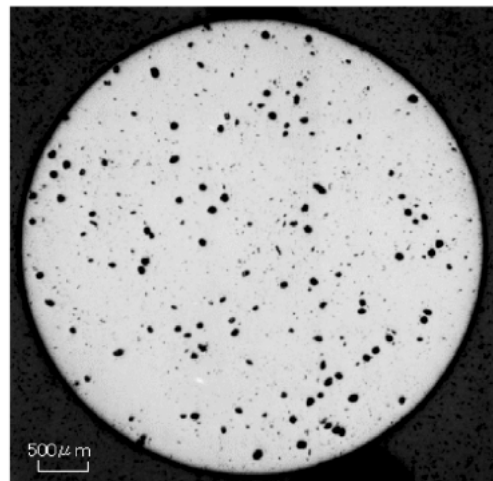


写真2 ペレット断面の金相写真

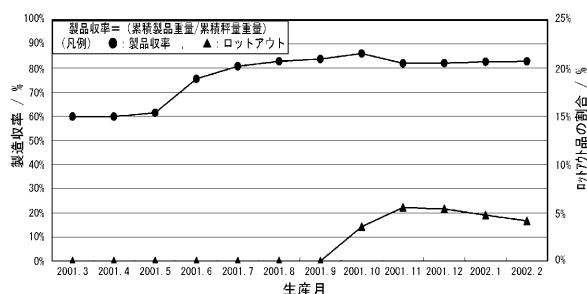


図3 燃料ペレットの製造収率

り耐久性のある部品の使用や粉末噛み込みが起らない構造とするなど設備性能を高めていく必要があるほか、設備故障時にバックアップ設備を速やかに立ち上げる体制を整えておく必要がある。現在、ペレット製造工程において律速となっている造粒や検査、成型設備のバックアップ設備については老朽化が進んでいることから、計画的に設備更新を行っていく予定である。これらの設備の整備を進めていくことで、ペレット製造工程の設計能力を満足することができると考えている。

3. 運転実績

本燃料製造では新設した秤量設備、造粒設備、予備焼結設備、仕上検査設備、粗粉碎・粉碎設備や更新を行った保管搬送設備を用いてペレットの製造を行った。これらの設備の新設等にあたっては、作業員の被ばく低減や保障措置上の観点から、設備内ホールドアップの抑制のための粉末回収用の集塵機等、飛散したMOX粉末を容易に回収できる機能を付加した。またペレット製造工程の生産性向上のため、機能改良及び複合化による設備処理能力の向上、設備のコンパクト化等によるメンテナンス性の向上（設備稼働率の向上）、という観点に着目しつつ設備開発を行った。新設等を行った設備の開発ポイントを表3に示す。この表に示すように、予備焼結設備では皿容器保管

棚を設け、次処理ロットを事前に受け入れるようにすることで搬送に係る時間を短縮し、処理能力の向上を図り、密度採取測定設備では従来設備で問題となっていた搬送中のペレット落下が起らないよう、搬送方式をペレットをベルトに載せ運搬するコンベア方式から、ペレットがレールに掘られた溝内を移動する搬送レール方式とするなど、設備ごとに処理能力を高めるための開発を行っている。これらの設備開発の中で、本燃料製造においてペレット製造工程の能力向上に特に大きな成果のあった仕上検査設備、粗粉碎・粉碎設備の開発実績について以下に述べる。

3.1 仕上検査

燃料ペレット製造工程のペレット検査工程では、従来 外周研削設備、外径密度選別設備、外観選別設備、の3設備を用いていた。本燃料製造ではこれらの設備の機能を1つの設備に複合化した仕上検査設備を開発し、導入した（図4参照）。本設備の導入により、従来3設備で処理していた検査工程が1設備により処理でき、設備設置面積当たりの処理能力が大幅に向上した。また、設備のコンパクト化により設備メンテナンスや運転管理が容易となった。図5に処理開始当時の処理時間を1とした時の、各ロットごとの処理時間の推移を示す。図5に示すように、処理開始

表3 新設等を行った設備の開発のポイント

	更新等を実施した設備名	工 程 名	設 備 開 発 の ポ イ ン ト
新設	Pu缶開缶詰替設備	詰 替	・粉末搬送容器からPu缶への詰替専用装置の設置による処理能力向上
	原料混合設備	混 合	・混合後の粉末を効率良く容器へ排出できる方法へ変更することで処理能力向上
	原料受入秤量設備	秤 量	・秤量する原料粉末を効率良く容器へ排出できる方法へ変更することで処理能力向上
	混合造粒設備	添加混合 造 粒	・設備内の粉末搬送に気流搬送を導入することで粉末飛散を防止
	予備焼結設備	予備焼結	・皿容器保管棚設置により、処理中に次処理ロットを受け入れておくことが可能となり処理能力が向上 ・オフガス機能追加により、設備内への添加剤飛散が防止でき、設備メンテナンス性向上
	仕上検査設備	研 削 外径密度選別 外観選別	・3設備分の機能を1設備に集約することで設置面積当りの処理能力向上 ・設備のコンパクト化によるメンテナンス性向上
	密度採取測定設備	工程内検査	・コンベア方式からペレットが落下しにくい振動フィーダを用いたレール方式に搬送方式を変更することで、ホールドアップ低減及び処理能力の向上
	粗粉碎・粉碎設備	乾式回収	・粉碎処理を1パス処理から繰り返し処理に変更することで粉碎能力の向上
更新	保管搬送設備	-	・搬送機器性能の向上及び制御ソフト改良による搬送能力向上

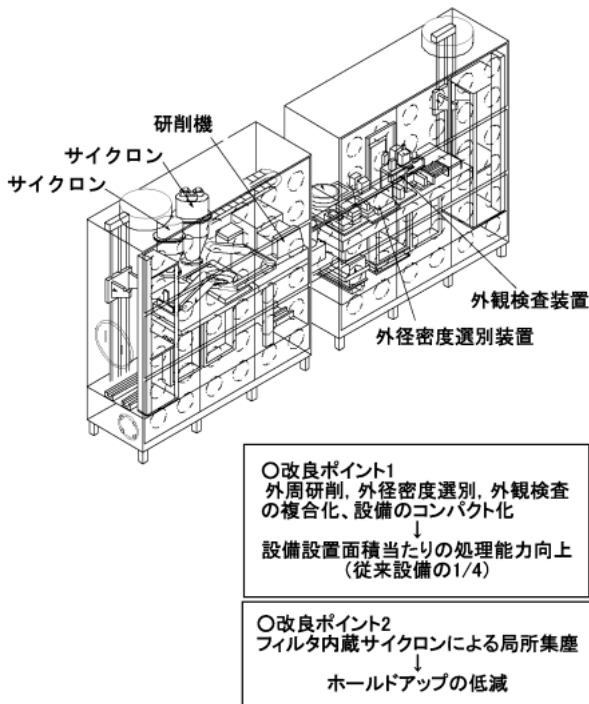


図4 改良型仕上検査設備の概略図

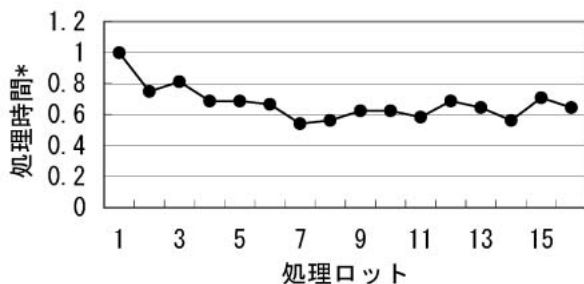


図5 仕上検査設備の処理時間の推移

* 処理時間は1ロット目の処理時間を1とした

当初は設備初期故障等により処理時間は長くなっていたが、運転を重ねながら不具合箇所の調整を図っていくことで次第に処理速度を高めることができ、最終的には処理開始当初の約60%まで短縮できた。

3.2 粗粉碎・粉碎設備

燃料ペレット製造の原料の一つである乾式回収粉末は、前回燃料製造までは図6に示す従来のフローで製造していた。この中で焙焼還元工程はMOX中の UO_2 が酸化されて U_3O_8 に変化する際に起こる結晶構造の変化を利用してペレットを破碎し、微粉化する工程であり、軽水炉のような UO_2 を原料としている燃料では焙焼還元によるペレ

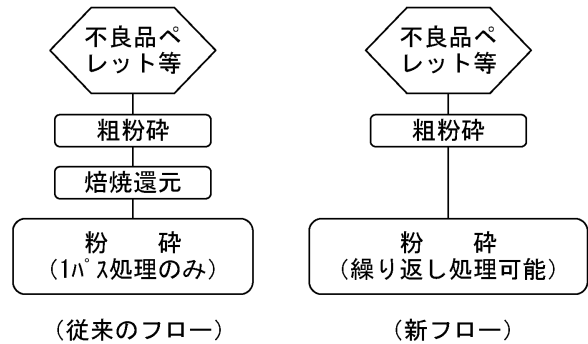


図6 第三開発室乾式回収処理工程のフローシート

トの破碎は効果的である。一方、 PuO_2 は UO_2 とは異なり、酸化されないため、「常陽」燃料ペレットのように PuO_2 が30wt.%程度含まれているMOXペレットでは、 PuO_2 の影響によりペレットの破碎が進みにくい。

「常陽」燃料製造における粗粉碎工程、粉碎工程は機械的にペレットを破碎する工程であり、粗粉碎工程ではロールクラッシャを用いてペレットを粗く砕き、粉碎工程ではジェットミルを用いて粗粉碎後のペレットを微粉碎する。本燃料製造から新規に導入した粗粉碎・粉碎設備は、従来ジェットミル内を1回通すのみだった粉碎処理を、粉末が一定の大きさになるまで繰り返し粉碎処理を行うことができ、従来設備に比べ、より粒径の小さい粉末を製造できる。

以上のことから、新規に導入した粗粉碎・粉碎設備の使用により、焙焼還元による破碎を行わなくても焼結性の良い乾式回収粉末が製造できると考えた。そこで本燃料製造から、乾式回収粉末の製造で焙焼還元工程を除き、粗粉碎/粉碎処理のみを行うことで工程の短縮を図った。

表4に本燃料製造と前回燃料製造で使用した乾式回収粉末の比表面積、O/M、不純物含有率及び

表4 乾式回収粉末物性の比較

項目	今回 (粗粉碎/粉碎処理のみ)	前回 (粗粉碎/焙焼還元/粉碎処理を実施)
比表面積 (m ² /g)	1.2	0.32
O/M	2.38	2.37
不純物量合計 (ppm)	1996	1355
乾式回収粉末25wt.%添加して製造したペレットの密度 (%TD)	95.4	94.5

乾式回収粉末を25wt.%添加して製造したペレットの焼結密度の比較を示す。この結果を見ると、本燃料製造で使用した乾式回収粉末の比表面積が前回燃料製造に使用した乾式回収粉末に比べ大きく、焼結性が良いことが分かる。また、乾式回収粉末を25wt.%添加し、同一条件で製造したペレットの焼結密度についても本燃料製造の方が高く、焼結性が良いことが分かる。一方、不純物含有率については本燃料製造で使用した乾式回収粉末において増加が見られたが、燃料製造での使用上は問題とならない程度であった。これらのことから、新設した粗粉碎・粉碎設備を使用することで乾式回収粉末の製造工程の1つである焙焼還元工程を省き、工程を短縮することに問題がないことが確認できた。

4．品質保証体制の強化

ブルトニウム燃料センターでは本燃料製造期間に、ISO 9001品質保証システムの認証を取得した。本品質保証システムの導入により、品質管理体制の強化や従業員の品質管理に関する意識の高

揚を図ることで、顧客に満足を与える高い品質の燃料集合体を提供できるように努めている。

5．おわりに

本燃料製造では、燃料製造開始当初は設備調整不足による装置取り合い箇所の不具合発生などにより計画通りに進捗しなかった。しかし、不具合箇所の改修や設備制御ソフトの修正等、可能な限り対策を打つことで課題の解決を図り、予定期間に所定量の燃料ペレットを製造することができた。ペレット製造工程の処理能力については、本燃料製造でのデータにばらつきはあるものの、バックアップ設備等の整備、強化を図ることで、所定の能力を十分満足できる見通しを得た。また、この間に乾式回収粉末処理工程の中の焙焼還元工程を省略し、工程の短縮が可能であることを確認した。これらの経験を今後の燃料製造に反映させると共に、自動化燃料製造設備による燃料製造の実績データとして蓄積し、今後の設備改開発等に活用していきたい。