

FBR用中空ペレット製造技術開発(4)

基礎技術開発成果の中間報告

1996年7月

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to:Technology
Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)

1996年7月

FBR用中空ペレット製造技術開発(4)

基礎技術開発成果の中間報告

報告者；野上嘉能*，飯村直人*，
宮本 寛**，小幡真一*
実施責任者；上村勝一郎*

要 旨

FBR用中空ペレットは、FBRの炉心性能の高度化を目指して開発されている。動燃では、照射試験燃料としての中空ペレット製造経験を有しているものの、ドライバー燃料規模の量産経験が無い。中実ペレット製造法と異なるのは、成形時に中空コアロッドが必要となる点であり、この点を中心とした製造技術開発が求められている。プル開室においては、関係各部との調整の上、全体計画に沿った基礎技術開発基本計画（平成5年10月 PNC ZN8410 93-216）を策定し、今日までこれに沿った中空ペレット製造基礎技術開発を推進してきた。

平成7年10月の「報告と講演の会」で燃料の太径化及び高線出力化による原子炉の「経済性と信頼性」向上を図る旨の報告がなされたことを契機として、MOX燃料高度化計画全体の中での中空ペレット製造技術開発計画の策定の動きが活発になってきている。プル開室においてもPu規格外品の再確定作業以降の計画立案上、現在の到達点を明らかにしておく必要があると判断した。

これらの理由から、これまでプル開室で実施してきた中空ペレット製造技術開発の経過、実績及び得られた知見について整理し報告するものである。

現在のところ、成形設備に用いられる中空コアロッドの開発はほぼ終了し実規模量産試験に供するところまで来たが、製造技術及び物性評価についてはUO₂での造粒試験を実施した所までである。

中空ペレット量産化のために、今後プル工場において実規模UO₂、MOX中空ペレット量産試験を実施していくが、これと残された基礎試験（中空ペレットを製造する上で最適な造粒、成形、焼結条件の把握及び、粉末流動性評価手法の最適化など）を実施していく必要がある。

* 核燃料技術開発部 プルトニウム燃料開発室

**現、本社 核燃料サイクル技術開発部 フロンティア研究推進室

目 次

1. 概 要	1
2. 中空ペレット製造技術開発 経過及び実績	3
3. これまでの中空ペレット製造技術開発で得られた知見と今後の課題	3
4. 今後の予定	3

図 リ ス ト

図 1 中空ペレット製造技術開発WBS展開（プル開室担当分）	4
--------------------------------------	---

表 リ ス ト

表 1	計画立案・審議及び量産製造技術調査等に関する実績工程	5
表 2	計画立案・審議及び、量産製造技術調査等に関する資料の概要	6
表 3	中空ペレット製造実績並びに成形装置、製造技術及び物性評価に関する開発の 実績工程	11
表 4	中空ペレット製造実績並びに成形装置、製造技術及び物性評価に関する開発の 資料の概要	12
表 5	S53年度～H2年度における中空ペレット製造の実績工程	16
表 6	中空ペレット製造実績の資料の概要	17
表 7	これまでの中空ペレット製造技術開発で得られた知見と今後の課題	19

1. 概要

FBR用中空ペレットは、FBR炉心性能の高度化を目指して開発されている。FBR用ペレットは、中空化することで燃料の高線出力化が可能になり、同一炉出力に必要となる燃料棒本数の低減を図ることができ、スミヤ密度を調整することで高燃焼度化にも対応でき、核燃料サイクルのコスト低減につながる。しかし、動燃における中空ペレット製造実績としては、プル開室におけるINTA-1, 2等の照射燃料製造及びプル工場製造課（ATRライン）におけるBWR-Puサーマル用中空MOX燃料製造などに限られており、量産実績が無い。中空ペレットは、中実ペレットの製造に比べて成形するとき中空コアロッドが必要になる。この中空コアロッドがあることから、FBR用中空ペレットを量産するための製造技術開発が求められている。

プル開室では、FBR用中空ペレット製造技術開発の一環として関係各部との調整の上、全体計画に沿った基礎技術開発基本計画（平成5年10月 PNC ZN8410 93-216）を策定し、今日までこれに沿った中空ペレット製造技術開発を推進してきた。

一方事業団は、「報告と講演の会」（H7年10月）において、今後のFBR燃料リサイクル実用化へのステップについて報告した。この中で事業団は、ペレットの太径への移行によるペレット生産性向上及び燃料の高線出力化による原子炉の高性能化を基本に、「経済性と信頼性」向上に向けた研究開発を展望すると報告した。

燃料の太径化及び高線出力化には、中空ペレットの開発が必要不可欠であることから、H8年5月にプル工場より「MOX燃料製造技術高度化実施計画(案)」が提案された。この計画(案)の検討及び今後実施すべき開発課題の見直しの議論のために、プル開室で行ってきた中空ペレット製造技術開発の到達点を明らかにしておく必要がある。

またプル開室においても、プル規格外品の再確定作業（H6年度～H8年度）により中空ペレット製造技術開発が鈍化したことから、再確定作業以降の中空ペレット製造技術開発計画策定に向け、現在の到達点を明らかにしておく必要があると判断した。

これらの理由から、H3年度～H7年度を中心として実施してきた中空ペレット製造技術開発の技術調査、試験計画の立案・審議、R&Dの計画・実施・報告、中空ペレット製造実績調査等の経過、実績及びR&Dで得られた知見について整理し、報告するものである。なお本報告は、前述した基礎技術開発基本計画中のWBS展開に沿った形でまとめた。

現在までのプル開室における基礎技術開発において得られた主な知見について、次に示す。

(1) 成形装置に関する開発

- ① 中空コアロッドは、超硬合金の場合 $\phi 1.5\text{ mm}$ 以上（高速度工具鋼の場合 $\phi 2.0\text{ mm}$ 以上）

の直径で、且つ応力集中しにくい形状（形状係数 α_k を1.1～1.3程度）に設計すれば、座屈しない。（但し側圧係数 $m=1/3$ 、壁面摩擦係数 $\mu=0.1$ と仮定した場合の評価）

- ② 摩耗試験の実施鋼種（AF1, GH880R, GA30, SKH51）のうち、AF1（超微粒超硬合金）及びGA30（中粒超硬合金、G5と同鋼種でこれまでPu-1、Pu-3で金型の使用してきた鋼種）の耐摩耗性（摩耗量、表面粗さ）は、ほぼ目標値に達している。

(2) 製造技術に関する開発

- ① UO_2 粉においては、本試験の造粒条件（バインダ添加率(0.5, 1.0%)、仮成形圧(1, 2, 3tonf/cm²)、分級サイズ(212～425, 425～600, 600～850, 212～600, 425～850, 212～850 μ m) の範囲では、(Carrの流動性評価手法* による) 造粒粉の流動性に、差は見られなかった。

* ; 流動性評価はCarrの流動性指数による。

本来は安息角、圧縮度、スパチュラ角、均一度の4データから総合的に求める方法であるが、スパチュラ角については1回の測定に使用する量が多く今回の試験に適用できないため、安息角、圧縮度及び均一度のデータを用いてCarrの流動性指数で評価した。

- ② UO_2 粉においては、本試験の造粒条件（バインダ添加率(0.5, 1.0%)、仮成形圧(1, 2, 3tonf/cm²)、分級サイズ(212～425, 425～600, 600～850, 212～600, 425～850, 212～850 μ m) の範囲では、造粒粉の金型（ダイス径 ϕ 6.12mm、中空コアロッド径 ϕ 2.29mm）への充填性に差は見られなかった。

- ③ 造粒特性評価試験で得られた UO_2 造粒粉を用いて、「もんじゅ」中空ペレットよりも外径が小さい中空ペレットを製造することができた。（但し、手充填による。）

(3) 物性評価に関する開発

なし。

現在のところ、成形設備に用いられる中空コアロッドの開発はほぼ終了し実規模量産試験に供するところまで来たが、製造技術及び物性評価については UO_2 での造粒試験を実施した所までである。

中空ペレット量産化のために、今後プル工場において実規模 UO_2 、MOX中空ペレット量産試験を実施していくが、これと残された基礎試験（中空ペレットを製造する上で最適な造粒、成

形、焼結条件の把握及び、粉末流動性評価手法の最適化など)を実施していく必要がある。

本報告書には、筆者らが実施した試験以外に中空燃料製造技術開発に関連があり参考となる過去の技術開発の報告書等についてのレビューを記載している。それらの概要、結論等の表現は、それぞれの原典となった技術資料、エンジニアリングシート、メモ等の表現を、原則としてそのまま記載している。従って、現在の時点では必ずしも妥当でないものも含まれている可能性がある。よってこの資料の活用にあたっては、その点を十分考慮するとともに、必要に応じて担当者等に問い合わせることが望ましい。

2. 中空ペレット製造技術開発経過及び実績

2.1 計画立案・審議及び量産製造技術

表1に実績工程を、表2に技術レポート、エンジニアリングシート、議事録、メモとして残された資料について、その目的・概要・結論を示す。

2.2 中空ペレット製造実績並びに成形装置、製造技術及び物性評価に関する開発

表3に実績工程を、表4に技術レポート、エンジニアリングシート、議事録、メモとして残された資料について、その目的・概要・結論を示す。

2.3 S53年度～H2年度における中空ペレット製造実績調査

表5に製造の実績工程を、表6に技術レポート、エンジニアリングシート、メモとして残された資料について、その目的・概要・結論を示す。

3. これまでの中空ペレット製造技術開発で得られた知見と今後の課題

表7に標記の知見と課題を示す。

4. 今後の予定

本報告書では、中空ペレット製造技術に関するこれまでの開発成果を、やや浅いが全般的・網羅的にまとめた。

今後は、現在継続中のR&D及びすでに終了したR&Dについて、詳しい検討・評価を加えて技術資料化を進める。その上で、残された課題の整理と今後の実施計画を策定する。

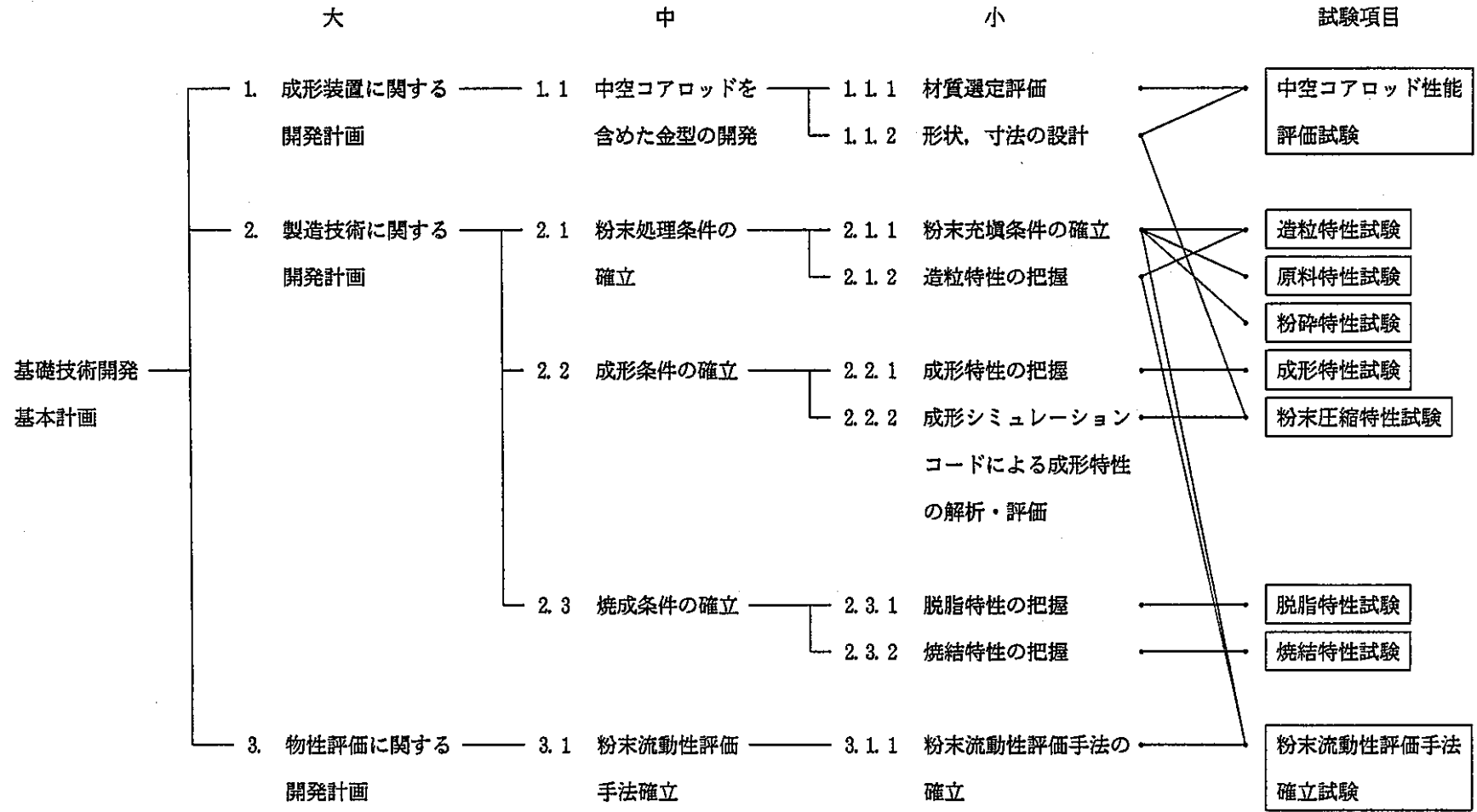


図1 中空ペレット製造技術開発WBS展開
(プル開室担当分)

表1 計画立案・審議及び量産製造技術調査等に関する実績工程

照射燃料製造等	キャンペーン名等	平成2年度 (1990)				平成3年度 (1991)				平成4年度 (1992)				平成5年度 (1993)				平成6年度 (1994)				平成7年度 (1995)				平成8年度 (1996)				資料番号	備考
		1	4	7	10	1	4	7	10	1	4	7	10	1	4	7	10	1	4	7	10	1	4	7	10	1	4	7	10		
開発項目	試験項目																														
【開発項目】	【試験項目】																														
1. 全体計画の立案、審議、承認	1.1 FBR用中空ベレット燃料の製造に関する検討(中空ベレット燃料製造検討Gr.)	メモ「FBR用中空ベレット燃料の製造に関する検討」(Pu工場、炉燃室、Pu開室共著)																													
	1.2 第8回燃料開発会議(施設部、動開本部、サイクル部共催)	中空開発計画検討、承認 資料「FBR中空ベレット燃料開発計画について」																													
	1.3 研究開発幹部会	中空開発計画検討、承認																													
2. 試験計画の立案、審議	1.1 FBR用中空ベレット製造技術開発基礎技術開発基本計画の立案	作成 検討																													
	FBR用中空ベレット燃料開発Pu開室内検討会	▼Eシート発行 (Pu開-03-107, 「中空ベレット製造技術開発基礎特性評価試験(1)」) ▼Eシート発行 (Pu開-03-144, 「FBR用中空ベレット製造技術開発基礎特性評価試験」) ▼Eシート発行 (Pu開-04-101, 「FBR用中空ベレット製造技術開発基礎試験(試験の全体概要について)」) ▼Eシート発行 (Pu開-05-150, 「FBR用中空ベレット製造技術開発要約版」) ▼Eシート発行 (Pu開-05-221, 「基礎技術開発基本計画書について」)																													
	Pu開室研究員会議	第1回▼ 議事録「FBR中空ベレット燃料開発室内検討会(第1回)」 第2回▼ 議事録「FBR中空ベレット燃料開発室内検討会(第2回)」 第3回▼ 議事録「FBR中空ベレット燃料開発室内検討会(第3回)」 第4回▼ 議事録「FBR中空ベレット燃料開発室内検討会(第4回)」																													
	中空ベレット量産製造技術検討会	基礎技術開発基本計画書の発表 第1回▼ 議事録「中空ベレット量産製造技術検討会(第1回)」 第2回▼ Eシート発行 (Pu開-05-240, 「中空ベレット量産製造技術検討会(第2回) 議事録」)																													
	FBR用中空ベレット製造技術開発(1)基礎技術開発基本計画書	発行、印刷、配布 (計画書No. PNC ZN8410 93-216, 「FBR用中空ベレット製造技術開発(1)基礎技術開発基本計画」)																													
			①-3 第1回議事録 ①-4 第2回議事録 ①-5 第3回議事録 ①-6 第1回議事録 ①-7 第2回議事録 ①-8 PNC ZN8410 93-216																												
3. 量産製造技術調査等	3.1 中空ベレットの大量生産に関する技術調査(飛田, 野上)	Eシート発行 (Pu開-02-265, 「中空ベレットの大量生産に関する技術調査」)																													
	3.2 第10回最新の粉末冶金技術講座受講-粉末の圧密成形メカニズム他-(野上)	受講 報告「粉末成形解析に関する資料」																													
	3.3 真空押出装置の適用調査	▼Eシート発行 (Pu開-04-095, 「真空押出装置について」) ▼Eシート発行 (Pu開-04-113, 「押出成形法の開発」) ▼Eシート発行 (Pu開-04-178, 「押出成形試験中間報告」)																													
	3.4 マルエージング鋼の適用可能性評価(中空コアロッドに対する)	Eシート発行 (Pu開-04-107, 「マルエージング鋼の適用可能性評価」)																													
	3.3 ロータリープレスの適用調査	Eシート発行 (Pu開-04-206, 「ロータリープレス方式での中空ベレットの製造について」)																													
	3.4 中空ベレットに関する情報交換会議-カダラッシュ研究所出張(宮本)-	▼Eシート発行 (Pu開-04-270, 「プランスの燃料製造の概要と中空ベレット製造に関して」; 海外出張事前レビュー) ▼Eシート発行 (Pu開-05-049, 「海外出張報告(第2報)」) 発行・配布 [海外出張報告書No. PNC ZN9600 93-012 「日欧燃料専門家会議出張報告」] ▼Eシート発行 (Pu開-05-220, 「MOXベレット製造に関する海外技術調査まとめ表」)																													
	3.5 日英FBR情報交換会議(上村室長)	発行・配布 [海外出張報告書No. PNC ZN8600 93-005 「FBR燃料に関する日英情報交換会議」]																													
	3.6 有限要素法によるUO ₂ 成形体内密度分布の解析	Pu開室での説明会 (NFD梁井氏他)																													
		①-9 Pu開-02-265 ①-10 粉末冶金技術受講報告 ①-11 Pu開-04-178 ①-12 Pu開-04-107 ①-13 Pu開-04-206 ①-14 Pu開-04-270 ①-15 PNC ZN9600 93-012 ①-16 Pu開-05-220 ①-17 PNC ZN8600 93-005 ①-18 原子力学会発表要旨(1994年秋の大会)																													

表2 計画立案・審議及び、量産製造技術調査等に関する資料の概要 1 / 5

開発項目	試験項目等/資料分類等/発行者	資料番号	目的と概要	結論
1. 全体計画の立案、審議、承認等	1.1 FBR用中空ペレット燃料の製造に関する検討 資料分類等；検討報告メモ 発行者；中空ペレット燃料製造検討Gr	①-1	もんじゅ初装荷燃料製造時において直面している低密度仕様のペレット生産歩留りに低下を回避する方策の一つとしての中空ペレット燃料の製造時の問題点をまとめ、以下の二点について検討した。 (1)もんじゅ初装荷燃料製造時における救済策になるか？ (2)もんじゅ取替燃料製造時で最も早い時期の中空高密度化はいつ頃か？ 検討においては、中空ペレットの製造、検査、充填上の各課題点を洗い出し、量産規模で中空ペレット燃料製造を実施するために必要な開発項目を明らかにした。	(1)もんじゅ初装荷燃料製造時における救済策にならない。 (2)もんじゅ取替燃料製造時で最も早い時期の中空高密度化の実現は、平成9年度である。 過去のMOX中空ペレット製造経験を踏まえると、以下の課題が重要である。 ①中空部を成形する中空コアロッドの破損防止及び耐久性 ②成形孔にMOX粉末が均一に、且つ速やかに充填されること。 特に、中空径が2mm程度より大幅に細くなる場合には、中空コアロッドの強度等の制限により、現在の乾式成形法の枠内での製造が困難な状況も考えられる。
	1.2 第8回燃料開発会議 資料分類等；配布資料及び議事録 発行者；施設部、動開本部、サイクル部	①-2	関係者の理解を得て、低密度中実ペレットから高密度中空ペレットへの開発を事業団の方針とする。 配布資料：1. 中空ペレット開発の必要性 動開本部作成 2. 燃料開発上の位置付け 動開本部、サイクル部作成 3. 燃料開発上の課題、開発工程、予算と要員 サイクル部、施設部作成	中空ペレット製造についての研究開発を加速するためには、関係者の理解を得て、低密度中実ペレットへの開発を事業団の方針とする必要があることが確認された。 H4年12月までに基本計画を作り、研究開発幹部会へ出すこととなった。
2. 試験計画の立案、審議	1.1 FBR用中空ペレット燃料開発Pu開室内検討会 資料分類等；議事録（第1回～3回） 発行者；プル開室（加藤直）①-3（宮本）①-4（小幡）①-5	①-3	1. プル開室内検討会の主旨説明（上村室長） 本会議は、中空ペレット燃料開発に関し、プル開室の柱として位置づけて、定期的を実施する。またプル工場並びに技推部との連携も図る。 2. 中空ペレット製造技術開発全体計画の説明（飛田主査） 3. 造粒特性評価試験結果の報告（宮本）	2. 中空ペレット製造技術開発全体計画の説明 ① プル開室は基礎的なところ、プル工場はMock up、実機及び検査技術に関して担当する。 ② 最終総合評価は、プル工場からの要望により、当初より早めて1999年とする。 ③ 中空ペレット製造技術開発のフィードバック先は、FBR全てのタイプをターゲットとする 3. 本試験で使用した劣化U粉末では、バインダの添加量、分級サイズ、仮成形形の違いによる粉末の流動性に差は見られなかった。
		①-4	1. 中空ペレット採用のメリットについての説明（中江炉燃室長代理） 2. 致密MOX PIE結果の報告（加藤正人） 3. 押出成形試験結果の報告（宮本） 4. 造粒特性評価試験の報告（宮本）	2. 照射後のペレット中心空孔周辺に欠損部分が観察された。 3. 押出成形法による成形は、脱気がポイント。特に水分中の脱気が必要。 4. Carrの流動性指数で流動性を評価すると、本試験の結果は変化がなかった。新たな流動性を評価する指標が必要なのではないか？（要検討）
		①-5	1. 中空コアロッド実用化のための性能評価試験計画書の説明（野上） (1) 中空コアロッドに働く応力 (2) 摩耗試験 (3) 疲労試験	(1) 短期的には引張・圧縮応力の評価、長期的には短期的応力による疲労の評価が必要。 (2) 表面粗さと摩耗量の2つが、評価すべき対象である。 (3) 寿命予想に必要な試験であるが、サンプル数、試験時間などの制約から再検討が必要。
	中空ペレット量産製造技術検討会 資料分類等；配布資料及び議事録 発行者；検討会事務局（小幡） 出席課室；サイクル部 技推部 プル工場 プル開室	①-6	1. プル開室における基礎技術開発基本計画（案）の説明（宮本）と質疑応答 ・従来の粉末の流動性評価は、系統立てて実施されておらず、原料粉末、造粒粉末がどの条件なら問題なく使えるのかを判断する指標がない。測定ITEMは種々あるが、現状でこれだというものはない。 ・軽水炉燃料メーカーは巧く行っているが、一定仕様の原料粉が供給されているため。 ・Pu工場としては、ダイスへの充填性に関するデータが欲しい。流動性指数としては動的な方法が望ましく、砂時計方式は有効と考える。 ・致密炉照射燃料製造の経験では、ペレットの押し出し時に金型とペレットの摩擦によるビビリでヘアークラックが発生した可能性がある。ルブリカントの添加だけでなく、金型への潤滑剤の供給も考えてはどうか？⇒BNFLでは中空コアロッドの表面粗さが重要と言っており、上記現象と関係していることも考えられる。 ・Pu工場としては、ロータリープレス機に開発は、人員と資金の手当てを前提としており当初のスケジュールでは無理。 2. 海外技術調査結果の中間報告（宮本） 英、仏における中空ペレット製造法について説明した。	1. プル開室における基礎技術開発基本計画について これらの討議により、本計画は基本的に了承された。
		①-7	1. 中空ペレット成形用金型の開発（I）金型の設計試作結果の説明（野上）と質疑応答 ・現在、中空径はボアゲージと呼ばれる市販の測定器を使用しているが、グリーンペレットの場合、接触部に塵みが生じるため、測定できない。 ・特製製造時に使用した中空コアロッドの表面粗さは、0.2sで製作した。 2. 中空コアロッド性能評価試験計画（案）の説明（野上）と質疑応答 ・コメントなし。	1. プル開室で金型の基礎データを取ることは重要であるが、成形機の設計に反映できるものとする必要がある。成形機のモックアップ室への導入に際しては、基本的な機構等の選定について、機器開発を担当するプル工場と基礎データを提供するプル開室が、一体となって進めることが重要である。 H4年度に策定した開発計画の見直しと実施体制の整備が必要であり、具体的なスケジュール、作業分担の検討を、プル工場-プル開室間で早急に行う。
		FBR用中空ペレット製造技術開発（I）基礎技術開発基本計画書	①-8	FBR用中空ペレットは、FBRの炉心性能の高度化を目指して開発されている。しかし、中空ペレットは中実ペレットの製造に比べて成形するときに中空コアロッドが必要になる。これがあるため、粉末の特性管理のような基礎的課題から、成形装置の量産性を考慮した構造設計上の課題がある。これらの課題を解決するため、関係各部との調整の上、全体計画に沿った

表2 計画立案・審議及び、量産製造技術調査等に関する資料の概要 2 / 5

開発項目	試験項目等/資料分類等/発行者	資料番号	目的と概要	結論
	資料分類等; PNC ZN 8410 93-216 発行者; プル開室 (宮本、他)		基礎技術開発基本計画を策定した。 尚、本計画は、事業団の中空ペレット製造技術開発の推進体制が明確になったところで見直しを行う。	④ 総合評価(1)でプル工場で実施する中規模モックアップ量産試験に使用する装置の基本仕様提示。開発計画のC&Rの実施。 2. プル工場担当分-中空ペレット製造技術開発 ① 中空ペレット検査装置の開発。 ② ATR実証炉用ローラーを改造してローラーでの基礎特性試験をプル開室と共同で実施。中実ペレットでの充填等の特性評価試験を中心とする。 ③ モックアップ室での中規模量産試験にて導入機構の確認及び性能確認、生産計画基礎データの確認、改良部分の確認。 ④ 総合評価(2)で第三開発室用装置仕様提示、及び加工設備の変更の検討。 ⑤ 第三開発室用装置の製作、確認試験の実施。 ⑥ 中空ペレット燃料製造開始に関する平成11年度の総合評価(3)の検討(目標)。
			<p style="text-align: center;">中空ペレット製造技術開発WBS展開 (プル開室分担分)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> <p>【大】</p> <ul style="list-style-type: none"> 1. 成形装置に関する開発計画 2. 製造技術に関する開発計画 3. 物性評価に関する開発計画 </div> <div style="width: 30%;"> <p>【中】</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.1 中空コアロッドを含めた金型の開発 2.1 粉末処理条件の確立 2.1 成形条件の確立 2.1 焼成条件の確立 3.1 粉末流動性評価手法確立 </div> <div style="width: 30%;"> <p>【小】</p> <ul style="list-style-type: none"> 1.1.1 材質選定評価 1.1.2 形状、寸法的设计 2.1.1 粉末充填条件の確立 2.1.2 造粒特性の把握 2.2.1 成形特性の把握 2.2.2 成形シミュレーションコードによる成形特性の解析・評価 2.3.1 脱脂特性の把握 2.3.2 焼結特性の把握 3.1.1 粉末流動性評価手法の確立 </div> </div> <div style="width: 30%; margin-left: 20px;"> <p>【試験項目】</p> <ul style="list-style-type: none"> 中空コアロッド性能評価試験 造粒特性試験 原料特性試験 粉碎特性試験 成形特性試験 粉末圧縮特性試験 脱脂 焼結 粉末流動性評価手法確立試験 </div>	
3. 量産製造技術調査等	資料分類等; Eシート 74開-02-265 発行者; プル開室 (野上、飛田主査)	①-9	中空ペレットの量産性を考えた際に、何処に着目した開発をしたら良いかの参考とするため、金型メーカー及びフェライト焼結体製品メーカーに出張し調査した。 金型メーカー; 富士通シンター(株) 湯本工場、いわき工場 フェライト焼結体製品メーカー; 富士電気化学(株) 湖西工場、富士見工場	1. 大量生産における金型の寿命は、主として摩耗である。 2. 細い中空コアロッドを使う場合の注意点 ① 上パンチの穴に粉が詰まらないようにする。 ② 中空コアロッドは、極力短尺にする。 3. 造粒粉の充填性を良くすることにより、大量生産における寸法・密度のパラッキを抑えることができそうである。 4. 焼結条件も製品の歪みに寄与している。炉内が均一になる方法の検討が必要。 5. 中空径の測定方法は、試験ペレットについてはボアゲージ、大量生産においては上・下限ゲージによる合否判定しか、今のところ見当たらない。
	資料分類等; 講習会概要報告 発行者; プル開室 (野上)	①-10	1. 金型内の粉粒体の流動シミュレーション (東大、相澤龍彦教授) 粉を一個の球形の剛体として取扱ひ、金型成形、MIMを対象とした映像化 (ビデオ) されたシミュレーション結果と、これを基に粉粒体の流動特性について、検討・考察したものの紹介。 2. 粉末の圧縮成形シミュレーション (神戸製鋼所、中川知和主任研究員) 粉を連続体として捉え、有限要素法によるHIP、CIP及びプレス成形による圧縮成形シミュレーションの紹介。	1 は、中空ペレット製造技術開発への適用には程遠い。 2 は、粉末成形シミュレーションとして実用可能と思われる。この解析プログラムを、中空ペレット製造技術開発に適用するには、以下の2点のデータ測定が必要である。 ① 金型材とMOXとの摩擦係数 ② 降伏応力 (MOX圧密時の側圧係数) なお上記解析プログラムは、神戸製鋼所より "PFORM" の名称で市販の予定。
	資料分類等; Eシート 74開-04-178 発行者; プル開室 (宮本)	①-11	中空ペレット製造技術として、湿式法である押出成形法の可能性を検討するため、酸化セリウムを用いて以下の試験を行った。 (1) 押出成形試験 (2) 脱脂条件把握試験 (3) 脱脂・焼結試験	(1) バインダの種類・量及び水分量を最適化することで、十分に押出成形が可能であった。 (2) 約 500℃で十分に脱脂することが分かった。 (3) 長尺酸化セリウム焼結体 (約30cm) を製作することができた。 以上の結果から、押出成形法による核燃料焼結体の製造は、可能性があることが分かった。但し核燃料として要求される仕様 (高度の寸法精度、長尺物の直線性など) を満足するための技術開発が必要である。
	資料分類等; Eシート 74開-04-107 発行者; プル開室 (宮本)	①-12	中空コアロッドには、耐摩耗性、座屈強度、衝撃応力 (破壊靱性値)、疲労強度などに優れた材料であることが求められる。 遠心機の回転胴材料として、靱性を保ちながら強さの限界に挑む材料として開発された経緯のあるマルエージング鋼について、中空コアロッドの材料としての適用可能性を検討した。	マルエージング鋼を超硬合金及び高速度工具鋼と比べて評価した。 破壊靱性値はマルエージング鋼の方が優れているが、耐摩耗性 (同一条件で簡易な摩耗試験を行った) については、明らかに劣ることが分かった。座屈強度についても劣っていた。

表2 計画立案・審議及び、量産製造技術調査等に関する資料の概要 3 / 5

開発項目	試験項目等/資料分類等/発行者	資料番号	目的と概要	結論
	<p>3.3 ロータリープレスの適用調査</p> <p>資料分類等；E-シート 7/開-04-206</p> <p>発行者；プル開室（宮本）</p>	①-13	<p>ロータリープレス方式での中空ペレットの製造可能性について、ロータリープレス機メーカー（菊水製作所）において、調査・打合せを行った。（なお⑤については菊水製作所の判断であり、グループボックス作業を考慮したうえでの判断ではないので注意が必要）</p> <p>① ロータリープレスとレシプロ式の大きな違いは、充填粉末、中空コアロッドに横向きに力が作用する点である。ダイスの回転が早いと粉末の供給にバラツキが生じ、中空コアロッドに曲げ応力が生じる。</p> <p>② 充填のための移動距離が長いので、同じ履歴の粉末であれば、ロータリープレスの方が充填性が良い。</p> <p>③ 中空ペレットを成形するのに最適なカム線図はカム線図に余りこだわる必要はない。</p> <p>④ 充填法には2方式（固定式、移動式）がある。移動式の方が確実に充填できるが、機構が複雑になる。</p> <p>⑤ ダイス交換は、キネホルダーと一体物のパンチを交換するだけで楽である。</p> <p>⑥ フェライトやセラミックス用の金型は、超硬合金（住友電工製D3, A1等）を使用している。中空コアロッドの破損は、大部分がセットミス。</p> <p>⑦ ロータリープレスは、レシプロ式に見られる（カム+油圧）方式の成形圧力制御はできない。ロータリープレスでは圧縮ロールの段数を増やすことで成形圧力を制御している。</p> <p>⑧ 充填性、成形性（結合力）、潤滑性（滑脱性）が成形の3要素である。充填性が良くても、成形性が良いとは言えない。（球形粒子は成形性が悪い。）</p> <p>⑨ 原料粉末のロットが代われば、同一条件であっても同じ製品ができるとは限らない。メーカーでは原料粉を熟練工が触って粉末の性質を把握し、その結果を基に原料粉末を用いて試験を行い条件を決めている。</p>	<p>中空ペレットの製造は、MOX粉末での流動性、造粒性を上げるための技術開発が必要である。そのためには、試作成形装置を早期に試作し、試験を開始したほうが良い。</p>
	<p>3.4 中空ペレットに関する情報交換会議 -カダラッシュ研究所出張（宮本）-</p> <p>3.4.1 「フランスの燃料製造の概要と中空ペレット製造に関して」 -海外出張事前レビュー-</p> <p>資料分類等；E-シート 7/開-04-206</p> <p>発行者；プル開室（宮本）</p>	①-14	<p>1993年4月に開催予定の日欧FBR燃料専門家会議に出席するにあたり、仏国の燃料製造の概要及び中空ペレットの製造についてレビューした。（スーパーフェニックスラインに関する情報からのレビュー）</p> <p>スーパーフェニックス用燃料ペレット仕様</p> <ul style="list-style-type: none"> ペレット寸法；OD= $\phi 7.14$ mm, ID= $\phi 2.0 \pm 0.2$ mm 到達密度；95.5 %T.D（スミヤ密度；約83%T.D） 製造量；約42 ton-MOX（ペレット約1110万個、燃料要素 110,920本、燃料集合体 410体） <p>1981年の製造実績から算出すると1日当たりの中空ペレット生産個数は約20,000個となる。投入原料47.5tonに対してプレス工程でのスクラップ量は257 kgであり、プレス工程での製造収率は99.46%となる。また、乾式回収粉としてリサイクルされた量は2.9tonで、投入原料に対する最終的な製造収率は（乾式回収粉の利用を含む）は約94%である。</p>	<p>スーパーフェニックス用燃料製造工程の特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> 【ボールミルによる粉砕、混合】 金属ウランボール（50kg）使用で40kg/バッチ 【均一化混合】 ボールミルの4バッチ分をロット混合（ステアリン酸亜鉛orステアリン酸カルシウム添加） 【造粒】 スラグプレス プレス圧：1 tonf/cm²（破砕の方法、分級メッシュ幅は不明） タブレット寸法：$\phi 35$mm×H 15mm（流動性の判断指標、測定方法は不明） 【成形】 ロータリープレス パンチ数：16（ホッパー形状等は不明） テーブルの大きさ：約$\phi 800$ mm 回転数：10 rpm プレス圧：4 tonf/cm²
	<p>3.4.2 日欧燃料専門家会議出張報告</p> <p>資料分類等；PNC ZN 9600 93-012</p> <p>発行者；中島、浅賀、宮本</p>	①-15	<p>日欧の国際協力協定に基づく燃料専門家会議に出席し、中空燃料の製造経験、照射実績の豊富な英国、仏国と情報交換を行って、今後の中空燃料に反映させる。英国（AFA）からの情報は照射に関するものであり、製造に関しては仏国（CEA, COGEMA）からのものである。</p> <p>仏国カダラッシュ研究所における「中空ペレットに関する情報交換会議」（CEA, COGEMA-PNC）の席上で議論となった点をまとめた。</p> <p>①燃料スペックについて</p> <ul style="list-style-type: none"> ペレット外径（Dep）は当初$\phi 7.14 \pm 0.07$mmであったが無研削で製造できるようにスペックを± 0.09mmに変更した。 ペレット密度（Dr）は95.5-2.5%T.Dとし、高密度側にスペックがない。 F値の導入 F値 < 200°C F = $1600(7.14 - Dep) + 20.5(95.5 - Dr)$① F値は最小密度スペック93%T.D以下のペレットを救うために導入した係数 <p>②スーパーフェニックス用燃料ペレットの製造実績（前出の①-14と重複する項目は除く）</p> <ul style="list-style-type: none"> 粉末取扱いは成形工程までのG、B雰囲気はN、雰囲気。 ペレット仕様値にCaのスペックはない。 ペレットの金相写真からはルブリカントとしてCa-Sを使用した方がZn-Sに比べて造粒痕が明瞭に現れる。 添加剤として使用しているZn-Sはルブリカントとしてのみ添加している。COGEMAの粉末はノーバインディングでもボールミル後の粉末結合が行われる。 ボールミルポットの内面コーティング材質は不明（Special Coating） 	<p>①式の第一項はペレット直径の変化に伴うギャップコンダクタンスの変化を見る項で、第二項はペレット密度の変化に伴う熱伝導率の変化を見る項であり、ペレットの直径、密度が変化することでペレット中心の融解の有無を検討するファクターである。</p> <p>【例】 F値を導入することで密度が93%T.D以下でもペレット直径が大きければ、F値が200未満となり合格ペレットとなる。</p> <p>↓ 確率論的設計手法の導入</p>

表2 計画立案・審議及び、量産製造技術調査等に関する資料の概要 4 / 5

開発項目	試験項目等/資料分類等/発行者	資料番号	目的と概要	結論																				
			<ul style="list-style-type: none"> 造粒方法はスラグ造粒 プレス方法はロータリープレス ダイスへの粉末充填については、粉末の流動性向上のみに着目するのではなく、プレス機の上下パンチの駆動スピードを変化させることで対応した。 中空コアロッドの材質は超硬合金の一種(WCベース)である。 ペレットの中空径の測定は抜き取り(15個/8000個)で実施、この際はボアゲージによる手動測定 ペレットが中空径φ2±0.2mmに管理されている保証は中空コアロッドの径と焼結時の収縮率で管理している。 予焼、本焼ともAr-7%H₂、雰囲気で連続した構造となっている。 焼結時のグリーンペレットはMo製ポット(弁当箱)にバラ積み 焼結密度のコントロールはボールミル条件と焼結温度で管理し、粉末のBET値には注意を払っていない。 ペレット研削はオーバースペック品のみ乾式で実施 																					
	<p>3.4.3 MOX燃料ペレット製造に関する海外技術調査のまとめ表</p> <p>資料分類等; 調査結果一覧表</p> <p>発行者: 宮本</p>	①-16	<p>中空ペレットの製造工程を、仏国(COGE MA)、英国(BNFL)及び日本(PNC)で比較し、一覧表にまとめた。</p> <p>MOX燃料ペレット製造に関する海外技術調査まとめ表(1/2)(中間報告)</p>																					
			<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="705 534 952 566">項目</th> <th data-bbox="952 534 1299 566">仏国(COGE MA-CFCa)</th> <th data-bbox="1299 534 1646 566">英国(BNFL-ウィンズケール)</th> <th data-bbox="1646 534 1982 566">日本(PNC-もんじゅラインの現状)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="705 582 952 710"> <p>1. 原料</p> <p>① 原料粉末の製造方法</p> <p>② 原料粉末の熱処理条件</p> <p>(a) 目的</p> <p>(b) 温度条件</p> <p>(c) 雰囲気</p> </td> <td data-bbox="952 582 1299 710"> <p>① 硫酸沈殿法(単体法)</p> <p>②</p> <p>(a) 原料粉末の比表面積をコントロールするため。</p> <p>(b) 800°C</p> <p>(c) 空気</p> </td> <td data-bbox="1299 582 1646 710"> <p>① 硫酸沈殿法(単体法)</p> <p>②</p> <p>(a) 原料粉末の比表面積をコントロールするため。</p> <p>(b) 550 ~ 600°C</p> <p>(c) ?</p> </td> <td data-bbox="1646 582 1982 710"> <p>① マイクロ波加熱直接脱硝法(混合法)</p> <p>②</p> <p>(a) 粉末の安定化</p> <p>(b) 800°C</p> <p>(c) Ar-H₂, Ar, CO₂</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="705 726 952 949"> <p>2. 粉砕工程</p> <p>① 粉砕方法</p> <p>② 粉砕条件</p> <p>(a) ポット容量</p> <p>(b) ボールの量</p> <p>(c) ボール材質</p> <p>(d) MOX粉の量</p> <p>(e) 内壁のライニング処理</p> <p>③ 添加物の添加タイミング</p> </td> <td data-bbox="952 726 1299 949"> <p>① ボールミル法</p> <p>②</p> <p>(a) 60ℓ</p> <p>(b) 50kg</p> <p>(c) 金属ウラン</p> <p>(d) 40kg</p> <p>(e) Special coating</p> <p>③ Ca-Stを造粒後にルブリカントとしてのみ添加。</p> </td> <td data-bbox="1299 726 1646 949"> <p>① ボールミル法、振動エネルギー粉砕法、流体エネルギー粉砕法、アトライタミル法よりアトライタミル法を採用。</p> <p>② (アトライタミル条件)</p> <p>(a) 直径 約70cm×高さ 約1m</p> <p>(b) 160kg</p> <p>(c) 1%Cr, Mn入りスチール</p> <p>(d) 25kg</p> <p>(e) ライニング処理は実施せず。</p> <p>③ Zn-St, ボアフォーマをアトライタミルの中にMOX粉末と同時に添加。</p> </td> <td data-bbox="1646 726 1982 949"> <p>① ボールミル法</p> <p>②</p> <p>(a) 65ℓ</p> <p>(b) 32ℓ</p> <p>(c) WC又はAl₂O₃</p> <p>(d) 40kg</p> <p>(e) Siライニング</p> <p>③ Zn-Stをボールミル後にバインダとして造粒後にルブリカントとして添加。</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="705 981 952 1220"> <p>3. 造粒工程</p> <p>① 造粒方式</p> <p>② 添加物(バインダとして)</p> <p>③ 造粒条件</p> <p>(a) 形状</p> <p>(b) 造粒圧</p> </td> <td data-bbox="952 981 1299 1220"> <p>① スラグ造粒法(乾式法)</p> <p>② バインダとしては無添加。</p> <p>③ スラグ造粒条件</p> <p>(a) φ35mm×H15mm</p> <p>(b) 1tonf/cm²</p> </td> <td data-bbox="1299 981 1646 1220"> <p>① バインダレス法 → 転動造粒法(Spheroidiser)</p> <p>バインダ法 → ?</p> <p>② バインダレス法 → Zn-Stとボアフォーマ</p> <p>バインダ法 → トリクロロエチレンにアクリリックバインダ</p> <p>5~8%vol%</p> <p>③ ?</p> </td> <td data-bbox="1646 981 1982 1220"> <p>① スラグ造粒法(乾式法)</p> <p>② バインダとしてZn-Stを約0.5wt%</p> <p>③</p> <p>(a) φ15mm×H1.5mm</p> <p>(b) 2tonf/cm²</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="705 1252 952 1396"> <p>4. 成形工程</p> <p>① 成形方式</p> <p>② 成形条件</p> <p>(a) パンチ数</p> <p>(b) テーブル径</p> <p>(c) 回転数</p> <p>(d) プレス圧</p> </td> <td data-bbox="952 1252 1299 1396"> <p>① ロータリプレス方式</p> <p>②</p> <p>(a) 16個</p> <p>(b) 約800mmφ</p> <p>(c) 100個/分</p> <p>(d) 約4tonf/cm²</p> </td> <td data-bbox="1299 1252 1646 1396"> <p>① レシプロ方式(油圧)</p> <p>②</p> <p>(a) 6個取り</p> <p>(b) _____</p> <p>(c) _____</p> <p>(d) ?</p> </td> <td data-bbox="1646 1252 1982 1396"> <p>① レシプロ方式(カム方式)</p> <p>②</p> <p>(a) 2個取り</p> <p>(b) _____</p> <p>(c) _____</p> <p>(d) 約4~5tonf/cm²</p> </td> </tr> </tbody> </table>	項目	仏国(COGE MA-CFCa)	英国(BNFL-ウィンズケール)	日本(PNC-もんじゅラインの現状)	<p>1. 原料</p> <p>① 原料粉末の製造方法</p> <p>② 原料粉末の熱処理条件</p> <p>(a) 目的</p> <p>(b) 温度条件</p> <p>(c) 雰囲気</p>	<p>① 硫酸沈殿法(単体法)</p> <p>②</p> <p>(a) 原料粉末の比表面積をコントロールするため。</p> <p>(b) 800°C</p> <p>(c) 空気</p>	<p>① 硫酸沈殿法(単体法)</p> <p>②</p> <p>(a) 原料粉末の比表面積をコントロールするため。</p> <p>(b) 550 ~ 600°C</p> <p>(c) ?</p>	<p>① マイクロ波加熱直接脱硝法(混合法)</p> <p>②</p> <p>(a) 粉末の安定化</p> <p>(b) 800°C</p> <p>(c) Ar-H₂, Ar, CO₂</p>	<p>2. 粉砕工程</p> <p>① 粉砕方法</p> <p>② 粉砕条件</p> <p>(a) ポット容量</p> <p>(b) ボールの量</p> <p>(c) ボール材質</p> <p>(d) MOX粉の量</p> <p>(e) 内壁のライニング処理</p> <p>③ 添加物の添加タイミング</p>	<p>① ボールミル法</p> <p>②</p> <p>(a) 60ℓ</p> <p>(b) 50kg</p> <p>(c) 金属ウラン</p> <p>(d) 40kg</p> <p>(e) Special coating</p> <p>③ Ca-Stを造粒後にルブリカントとしてのみ添加。</p>	<p>① ボールミル法、振動エネルギー粉砕法、流体エネルギー粉砕法、アトライタミル法よりアトライタミル法を採用。</p> <p>② (アトライタミル条件)</p> <p>(a) 直径 約70cm×高さ 約1m</p> <p>(b) 160kg</p> <p>(c) 1%Cr, Mn入りスチール</p> <p>(d) 25kg</p> <p>(e) ライニング処理は実施せず。</p> <p>③ Zn-St, ボアフォーマをアトライタミルの中にMOX粉末と同時に添加。</p>	<p>① ボールミル法</p> <p>②</p> <p>(a) 65ℓ</p> <p>(b) 32ℓ</p> <p>(c) WC又はAl₂O₃</p> <p>(d) 40kg</p> <p>(e) Siライニング</p> <p>③ Zn-Stをボールミル後にバインダとして造粒後にルブリカントとして添加。</p>	<p>3. 造粒工程</p> <p>① 造粒方式</p> <p>② 添加物(バインダとして)</p> <p>③ 造粒条件</p> <p>(a) 形状</p> <p>(b) 造粒圧</p>	<p>① スラグ造粒法(乾式法)</p> <p>② バインダとしては無添加。</p> <p>③ スラグ造粒条件</p> <p>(a) φ35mm×H15mm</p> <p>(b) 1tonf/cm²</p>	<p>① バインダレス法 → 転動造粒法(Spheroidiser)</p> <p>バインダ法 → ?</p> <p>② バインダレス法 → Zn-Stとボアフォーマ</p> <p>バインダ法 → トリクロロエチレンにアクリリックバインダ</p> <p>5~8%vol%</p> <p>③ ?</p>	<p>① スラグ造粒法(乾式法)</p> <p>② バインダとしてZn-Stを約0.5wt%</p> <p>③</p> <p>(a) φ15mm×H1.5mm</p> <p>(b) 2tonf/cm²</p>	<p>4. 成形工程</p> <p>① 成形方式</p> <p>② 成形条件</p> <p>(a) パンチ数</p> <p>(b) テーブル径</p> <p>(c) 回転数</p> <p>(d) プレス圧</p>	<p>① ロータリプレス方式</p> <p>②</p> <p>(a) 16個</p> <p>(b) 約800mmφ</p> <p>(c) 100個/分</p> <p>(d) 約4tonf/cm²</p>	<p>① レシプロ方式(油圧)</p> <p>②</p> <p>(a) 6個取り</p> <p>(b) _____</p> <p>(c) _____</p> <p>(d) ?</p>	<p>① レシプロ方式(カム方式)</p> <p>②</p> <p>(a) 2個取り</p> <p>(b) _____</p> <p>(c) _____</p> <p>(d) 約4~5tonf/cm²</p>	
項目	仏国(COGE MA-CFCa)	英国(BNFL-ウィンズケール)	日本(PNC-もんじゅラインの現状)																					
<p>1. 原料</p> <p>① 原料粉末の製造方法</p> <p>② 原料粉末の熱処理条件</p> <p>(a) 目的</p> <p>(b) 温度条件</p> <p>(c) 雰囲気</p>	<p>① 硫酸沈殿法(単体法)</p> <p>②</p> <p>(a) 原料粉末の比表面積をコントロールするため。</p> <p>(b) 800°C</p> <p>(c) 空気</p>	<p>① 硫酸沈殿法(単体法)</p> <p>②</p> <p>(a) 原料粉末の比表面積をコントロールするため。</p> <p>(b) 550 ~ 600°C</p> <p>(c) ?</p>	<p>① マイクロ波加熱直接脱硝法(混合法)</p> <p>②</p> <p>(a) 粉末の安定化</p> <p>(b) 800°C</p> <p>(c) Ar-H₂, Ar, CO₂</p>																					
<p>2. 粉砕工程</p> <p>① 粉砕方法</p> <p>② 粉砕条件</p> <p>(a) ポット容量</p> <p>(b) ボールの量</p> <p>(c) ボール材質</p> <p>(d) MOX粉の量</p> <p>(e) 内壁のライニング処理</p> <p>③ 添加物の添加タイミング</p>	<p>① ボールミル法</p> <p>②</p> <p>(a) 60ℓ</p> <p>(b) 50kg</p> <p>(c) 金属ウラン</p> <p>(d) 40kg</p> <p>(e) Special coating</p> <p>③ Ca-Stを造粒後にルブリカントとしてのみ添加。</p>	<p>① ボールミル法、振動エネルギー粉砕法、流体エネルギー粉砕法、アトライタミル法よりアトライタミル法を採用。</p> <p>② (アトライタミル条件)</p> <p>(a) 直径 約70cm×高さ 約1m</p> <p>(b) 160kg</p> <p>(c) 1%Cr, Mn入りスチール</p> <p>(d) 25kg</p> <p>(e) ライニング処理は実施せず。</p> <p>③ Zn-St, ボアフォーマをアトライタミルの中にMOX粉末と同時に添加。</p>	<p>① ボールミル法</p> <p>②</p> <p>(a) 65ℓ</p> <p>(b) 32ℓ</p> <p>(c) WC又はAl₂O₃</p> <p>(d) 40kg</p> <p>(e) Siライニング</p> <p>③ Zn-Stをボールミル後にバインダとして造粒後にルブリカントとして添加。</p>																					
<p>3. 造粒工程</p> <p>① 造粒方式</p> <p>② 添加物(バインダとして)</p> <p>③ 造粒条件</p> <p>(a) 形状</p> <p>(b) 造粒圧</p>	<p>① スラグ造粒法(乾式法)</p> <p>② バインダとしては無添加。</p> <p>③ スラグ造粒条件</p> <p>(a) φ35mm×H15mm</p> <p>(b) 1tonf/cm²</p>	<p>① バインダレス法 → 転動造粒法(Spheroidiser)</p> <p>バインダ法 → ?</p> <p>② バインダレス法 → Zn-Stとボアフォーマ</p> <p>バインダ法 → トリクロロエチレンにアクリリックバインダ</p> <p>5~8%vol%</p> <p>③ ?</p>	<p>① スラグ造粒法(乾式法)</p> <p>② バインダとしてZn-Stを約0.5wt%</p> <p>③</p> <p>(a) φ15mm×H1.5mm</p> <p>(b) 2tonf/cm²</p>																					
<p>4. 成形工程</p> <p>① 成形方式</p> <p>② 成形条件</p> <p>(a) パンチ数</p> <p>(b) テーブル径</p> <p>(c) 回転数</p> <p>(d) プレス圧</p>	<p>① ロータリプレス方式</p> <p>②</p> <p>(a) 16個</p> <p>(b) 約800mmφ</p> <p>(c) 100個/分</p> <p>(d) 約4tonf/cm²</p>	<p>① レシプロ方式(油圧)</p> <p>②</p> <p>(a) 6個取り</p> <p>(b) _____</p> <p>(c) _____</p> <p>(d) ?</p>	<p>① レシプロ方式(カム方式)</p> <p>②</p> <p>(a) 2個取り</p> <p>(b) _____</p> <p>(c) _____</p> <p>(d) 約4~5tonf/cm²</p>																					

表2 計画立案・審議及び、量産製造技術調査等に関する資料の概要 5 / 5

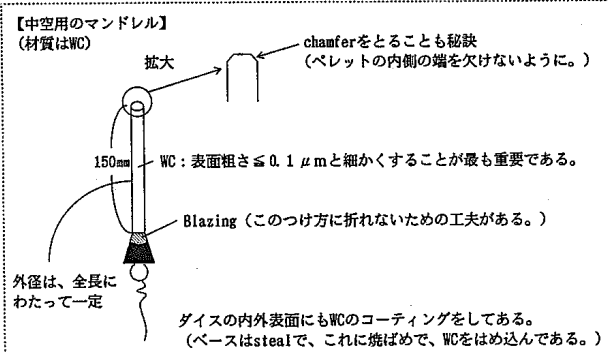
開発項目	試験項目等/資料分類等/発行者	資料番号	目的と概要	結論																								
MOX燃料ペレット製造に関する海外技術調査まとめ表(2/2) (中間報告)																												
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>仏国(COGE MA-CFCa)</th> <th>英国(BNFL-ウィンズケール)</th> <th>日本(PNC-もんじゅラインの現状)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>③ 中空コアロッド (a) 材質 (b) 形状</td> <td>③ (a) 超硬合金 (b)</td> <td>③ (a) 超硬合金 (b) ロウ付</td> <td>③ プル開室での試作品 (a) 超硬合金又は高速度工具鋼 (b) ロウ付</td> </tr> <tr> <td>5. 脱脂工程 ① 脱脂雰囲気 ② 単体で存在するか</td> <td>① Ar-H; ② 連続炉と一緒にしている。</td> <td>① CO; ② 連続炉と1体になっている。</td> <td>① Ar-H; ② 本焼炉と脱脂炉は別々</td> </tr> <tr> <td>6. 焼結工程 ① 焼結雰囲気 ② 焼結温度 ③ 焼結皿の構造及び整列方法</td> <td>① Ar-7%H; ② ? ③ Mo製ボードにばら積み</td> <td>① Ar-4%H; ② 1600~1650°C ③ Mo製ボードにきちんと整列</td> <td>① Ar-7%H; ② 1650~1700°C ③ Mo製の整列皿にきちんと整列</td> </tr> <tr> <td>7. グローブボックス雰囲気</td> <td>N₂</td> <td>N₂</td> <td>空気</td> </tr> <tr> <td>8. ペレット検査(密度) ① 測定頻度 ② スペック ③ 内径測定法</td> <td>① 抜き取り ② 95-2%T.D ③ ポアゲージ</td> <td>① 抜き取り { DFR: 20個/バッチ PFR: 8個/バッチ ② 95±1%T.D ③ 試作段階: ポアゲージ 量産段階: GO-NOゲージ</td> <td>① 全数検査 ② 85%T.D±2% ③ ポアゲージ { プル開室での照射燃料製造時 に使用</td> </tr> </tbody> </table>	項目	仏国(COGE MA-CFCa)	英国(BNFL-ウィンズケール)	日本(PNC-もんじゅラインの現状)	③ 中空コアロッド (a) 材質 (b) 形状	③ (a) 超硬合金 (b)	③ (a) 超硬合金 (b) ロウ付	③ プル開室での試作品 (a) 超硬合金又は高速度工具鋼 (b) ロウ付	5. 脱脂工程 ① 脱脂雰囲気 ② 単体で存在するか	① Ar-H; ② 連続炉と一緒にしている。	① CO; ② 連続炉と1体になっている。	① Ar-H; ② 本焼炉と脱脂炉は別々	6. 焼結工程 ① 焼結雰囲気 ② 焼結温度 ③ 焼結皿の構造及び整列方法	① Ar-7%H; ② ? ③ Mo製ボードにばら積み	① Ar-4%H; ② 1600~1650°C ③ Mo製ボードにきちんと整列	① Ar-7%H; ② 1650~1700°C ③ Mo製の整列皿にきちんと整列	7. グローブボックス雰囲気	N ₂	N ₂	空気	8. ペレット検査(密度) ① 測定頻度 ② スペック ③ 内径測定法	① 抜き取り ② 95-2%T.D ③ ポアゲージ	① 抜き取り { DFR: 20個/バッチ PFR: 8個/バッチ ② 95±1%T.D ③ 試作段階: ポアゲージ 量産段階: GO-NOゲージ	① 全数検査 ② 85%T.D±2% ③ ポアゲージ { プル開室での照射燃料製造時 に使用	
項目	仏国(COGE MA-CFCa)	英国(BNFL-ウィンズケール)	日本(PNC-もんじゅラインの現状)																									
③ 中空コアロッド (a) 材質 (b) 形状	③ (a) 超硬合金 (b)	③ (a) 超硬合金 (b) ロウ付	③ プル開室での試作品 (a) 超硬合金又は高速度工具鋼 (b) ロウ付																									
5. 脱脂工程 ① 脱脂雰囲気 ② 単体で存在するか	① Ar-H; ② 連続炉と一緒にしている。	① CO; ② 連続炉と1体になっている。	① Ar-H; ② 本焼炉と脱脂炉は別々																									
6. 焼結工程 ① 焼結雰囲気 ② 焼結温度 ③ 焼結皿の構造及び整列方法	① Ar-7%H; ② ? ③ Mo製ボードにばら積み	① Ar-4%H; ② 1600~1650°C ③ Mo製ボードにきちんと整列	① Ar-7%H; ② 1650~1700°C ③ Mo製の整列皿にきちんと整列																									
7. グローブボックス雰囲気	N ₂	N ₂	空気																									
8. ペレット検査(密度) ① 測定頻度 ② スペック ③ 内径測定法	① 抜き取り ② 95-2%T.D ③ ポアゲージ	① 抜き取り { DFR: 20個/バッチ PFR: 8個/バッチ ② 95±1%T.D ③ 試作段階: ポアゲージ 量産段階: GO-NOゲージ	① 全数検査 ② 85%T.D±2% ③ ポアゲージ { プル開室での照射燃料製造時 に使用																									
3.5 FBR燃料に関する日英情報交換会議(出張報告)	①-17	①-17	<p>日欧技術協力協定に基づき、英国AEAテクノロジーとの中空燃料及びバイバック燃料に関する情報交換を行うとともに、照射挙動、製造、検査に関する技術、経験について意見交換した。</p> <p>英国における高速炉燃料(MOX:UO₂)の製造経験</p> <p>(1) PFR燃料の製造</p> <ul style="list-style-type: none"> • PuO₂/UO₂の粉砕混合方法として、ボールミル法、振動エネルギー粉砕法、流体エネルギー粉砕法、アトライタミル法の4種を試行し、最終的にはアトライタミル法を採用した。理由は①処理時間が短い(30分)、②均一性が良い、③包蔵性が良い、である。 • バインダーはトリクロロエチレンにアクリリックバインダを混ぜたものを採用した。 • ルブリカントとしてはZn-Stを添加している。 • プレスは上下圧縮 • ペレット検査 <ul style="list-style-type: none"> 外径: 全数 密度: 抜き取り 内径: ポアゲージ→試作時、GO、NOゲージ→本番 (Minは規定があるがMaxは規定無し、スタック重量のMax規定、即ち線密度の規定により上限を抑えられている。) <p>(2) AGR用中空UO₂燃料の製造法</p> <ul style="list-style-type: none"> • 製造実績は300万本 • 脱脂炉の雰囲気はCO₂ • プレス機は6個取りの油圧式(ロータリープレス方式ではない) • 中空コアロッドの材質はWCで先端部にチャンファを設けることが秘訣。外径は全長(150mm)にわたって一定で表面粗さを0.1μm以下とすることが重要である。 • ダイスの表面にもWCをコーティングしている(steelに焼ばめ)。 																									
3.6 有限要素法によるUO ₂ 成形体内密度分布の解析	①-19	①-19	<p>UO₂成形体の密度分布は成形体の製造条件や粉末の種類に依存し、これが焼結後のペレット形状に影響を及ぼしていることが知られている。そこで成形条件や粉末の力学的性質を入力データとして粉末の成形過程を解析できる有限要素法コードが開発された。その結果、成形体内の密度変動は、成形時のダイス-粉末間の壁面摩擦係数に強く依存することが分かった。本研究では上記コードを用いて、UO₂粉末の力学的特性と一軸成形時の成形体内密度分布との関係について、考察した。</p>	<p>① 本コードによる一軸成形により製作された成形体内密度分布の計算結果は、EDXによる測定結果と±0.3%T.Dの精度で一致した。</p> <p>② 高圧側での密度増加率が大きな粉末は、成形体内の密度変動が大きい傾向が得られた。</p> <p>③ 高密度、高強度の凝集粒子により、高圧側の密度増加率が低減され、成形体内の密度変動が低減される傾向が得られた。</p>																								

表3 中空ペレット製造実績並びに成形装置、製造技術及び物性評価に関する開発の実績工程

照射燃料製造等 開発項目	キャンペーン名等 試験項目	平成2年度 (1990)			平成3年度 (1991)			平成4年度 (1992)			平成5年度 (1993)			平成6年度 (1994)			平成7年度 (1995)			平成8年度 (1996)			資料 番号	備 考		
		10	1	4	7	10	1	4	7	10	1	4	7	10	1	4	7	10	1	4	7	10			1	
【照射燃料製造等】 於：セラミック室 (R-125)	【キャンペーン名等】 1. INTA-2 (中空) 2. 低密度ペレット製造条件確立試験(II) 3. HAM (B8, TRU) 4. FMS (B8) 5. LDP-3 (中空) 6. IFA-590 (中空) 7. G.B.No.102熱処理炉修理 8. G.B.No.106ホイスト修理 9. Pu規格外品の再確定	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	③-6	Pu開-04-074		
		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	③-4	PNC PN8410 94-224
【開発項目】	【試験項目】																									
1. 成形装置に関する開発 1.1 中空コアロッドを含めた金型の開発	① 中空コアロッド実用化のための性能評価試験計画			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	②-1	PNC ZN80 94-001	
	② 金型の設計・試作			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	②-2	PNC ZN8410 93-228
	③ 中空コアロッド材料の摩耗試験 (委託先；住友金属テコノテ)																								②-3	PNC ZJ1040 95-001
	④ 中空コアロッド材料の疲労試験 (委託先；石川島検査計測機)																								②-4	H7年度Pu開室年報
2. 製造技術に関する開発 2.1 粉末処理条件の確立	① UO ₂ 造粒特性評価試験(I) (GPT)																								②-5	Pu開-04-015
	② UO ₂ 造粒特性評価試験(II) (GPT-2)																								②-7	Pu開-04-237
2.2 成形条件の確立 2.2.1 成形特性の把握	① MOX造粒成形特性試験 (MGP) -LDP-3 工程確証試験含む-																								②-8	UO ₂ 造粒特性評価試験(I)結果
	② 粉末圧縮試験器の設計・製作・設置																								②-9	UO ₂ 造粒特性評価試験(II)結果
2.2.2 成形シミュレーションによる成形特性の解析・評価	③ 粉末圧縮試験器の新設 (新設BOXの既設装置撤去を含む)																								②-11	注：MGP試験結果成形特性評価基礎試験(中間報告)
	④ 粉末圧縮試験器のコールドテスト及び装置改造																								②-12	Pu開-05-159
2.3 焼成条件の確立																									②-13	仕様書
3. 物性評価に関する開発 3.1 粉末流動性評価手法確立	① 粉末流動性評価手法確立試験																								②-14	Pu開-05-205
																									②-15	安息角測定結果
																									②-16	高活性粉末について意見交換(三菱97年)

表4 成形装置、製造技術及び物性評価に関する開発の資料の概要 1 / 4

開発項目	試験項目等/資料分類等/発行者	資料番号	目的と概要	結論
1. 成形装置に関する開発 1.1 中空コアロッドを含めた金型の開発	① 中空コアロッド実用化のための性能評価試験計画 資料分類等; PNC ZN 8410 94-001 発行者; プル開室 (野上、他)	②-1	<p>中空バレット製造技術開発の開発課題のうち、中空コアロッド実用化のための性能評価試験について、プル開室内検討会及び量産製造技術検討会での検討結果を反映した試験計画書である。本計画書は、既に試作された中空コアロッドの性能評価試験計画書である。</p> <p>試験フローを以下に示す。</p> <pre> graph TD A[中空コアロッド実用化のための性能評価試験] --> B[耐磨耗試験] A --> C[疲労試験] A --> D[粉末圧縮試験機のBOX内据付] B --> B1[↓] B1 --> B2[↓] B2 --> B3[↓] B3 --> B4[↓] C --> C1[↓] C1 --> C2[↓] C2 --> C3[↓] C3 --> C4[↓] D --> E[粉末圧縮特性評価試験] E --> F[軸圧縮力の推定] </pre> <p>耐磨耗性の評価 疲労強度の評価 座屈強度の評価</p>	<p>試験・評価 得たい知見 既知の知見 実施する必要がある試験の概要</p> <p>MOX粉末圧縮特性評価試験 側圧係数 (m) 無し 粉末の種類や処理条件をパラメータとした粉末圧縮におけるmとμの測定</p> <p>座屈強度の再評価 軸圧縮荷重より座屈荷重大きいか? ≥φ1.50mmのチップは、座屈荷重の方が大きい(座屈しない) mとμの実測値に基づいた軸圧縮力の再計算と座屈荷重との比較評価</p> <p>疲労試験 チップ部とろう接部が1×10°以上の疲労強度があるか? 無し チップ部材とろう接部材の回転曲げ疲労強度の測定</p> <p>耐摩耗試験 チップ部は1×10°チップ以上の耐摩耗性があるか? ある条件における耐摩耗性の比較データ有り チップ部材の摩耗進行線図を得るための耐摩耗性の加速試験粉末成形時の摩耗量の測定</p>
	② 金型の設計・試作 資料分類等; PNC ZN 8410 93-228 発行者; プル開室 (野上、他)	②-2	<p>FBR中空バレット製造技術開発の一環として、成形用金型を試作した。本報告書は、今後実施される中空コアロッドの性能評価試験に供するため、金型の設計及び強度、寿命についての予備解析を行い、試作結果についてまとめたものである。</p> <p>金型はプル第一開発室R-125 既設のウイズドロアル式プレスに取り付けられるものであり、中空コアロッド、上・下パンチ及びダイスから構成される。</p> <p>材質は予備解析及び使用実績等を基に、超硬合金(4種類)、高速度工具鋼(1種類)を使用し中空コアロッドのチップ部径がφ1.00~φ2.50mm(0.5mm毎)のものを試作した。</p>	<p>-中空コアロッドの予備解析結果-</p> <p>① 座屈強度; チップ部径が、超硬合金製≥φ1.50mm、高速度工具鋼≥φ2.00mmの場合、使用可能と推定される。但し、成形時の軸圧縮力に推定値 (m, μ) が入っているため、これらの解析を待って再評価する必要がある。</p> <p>② 疲労強度; チップ部径≥φ1.50mm⇒≥疲れ限度が≥49 kg/mm²の材料なら使用可能と推定。チップ部径≥φ2.00mm⇒≥疲れ限度が≥37 kg/mm²の材料なら使用可能と推定。</p> <p>③ 耐摩耗性; メーカーカタログ値などより、以下の順で耐摩耗性が良いと推定される。 (優) ⇐ AP1 ⇐ D2 ⇐ G5 ⇐ GH880R ⇐ SKH51 ⇐ GH96R</p>
	③ 中空コアロッド材料の摩耗試験 資料分類等; PNC ZJ1040 95-001 発行者; 西川富雄、網田敏夫 (住友金属㈱)	②-3	<p>FBR中空バレット製造技術開発の一つに中空コアロッド材料の延命問題がある。本報告書はコアロッド材料として硬さの異なる4種類の候補材料と、燃料バレット模擬材料として硬さの異なる2種類の材料について摩耗試験を行い、中空コアロッド候補材料の耐摩耗性を調査した結果に関するものである。主要な試験条件を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> 中空コアロッド候補材料; 超硬材料 (GH880R, GA30, AP1)、高速度工具鋼 (SKH51) 燃料バレット模擬材料; カーボンセラミックス、溶融シリカ 試験機形式; ピンオンディスク式摩耗試験機 摺動距離; Max 20,000 m (= 100万個のバレット成形時の金型摺動距離) 摺動速度; 23 m/min 面圧; 30, 70, 110 kgf/cm² 測定データ; 摩耗量、摺動面の粗さ、動摩擦係数 	<p>(結果)</p> <p>(1) 中空コアロッド候補材料の耐摩耗性の順序は、燃料バレット候補材料の硬さに依存せず、次の通り (劣) GH880R < SKH51 < AP1 ⇐ GA30 (優)</p> <p>(2) コアロッド候補材料の耐摩耗性は、材料の硬さでは推定できない。</p> <p>(3) 高速度工具鋼より超硬合金の方が耐摩耗性が良い。</p> <p>(4) 燃料バレット模擬材料が溶融シリカの場合、中空コアロッド候補材料の表面粗さは、次の通り (粗) GH880R < SKH51 < GA30 < AP1 (滑)</p> <p>(5) 燃料バレット模擬材料がカーボンセラミックスの場合、中空コアロッド候補材料の表面粗さは次の通り。したがって中空コアロッド候補材料の硬さや耐摩耗性では表面粗さを推定できない</p> <p>(6) 動摩擦係数は摺動距離による変化はない。</p> <p>(結論) 本試験結果及び抗折力に関するメーカー資料を考慮すれば、推奨される中空コアロッド候補材料は、AP1次いでGA30である。</p>
	中空コアロッド材料の摩耗試験に関する動燃としての評価 資料分類等; H7年度プル開室年報 2.2 中空バレット製造技術開発 発行者; プル開室 (野上、他)	②-4	<p>上記の試験結果を基に、動燃として必要な形で解析・評価したものであり、最終的には報告書にまとめる予定であるが、とりあえず現時点でまとめたものについて、記すものである。</p> <p>本試験における耐摩耗性の評価は、一つの金型で成形できる数を最多で100万個の成形が可能であることを基準とし、それに相当する摺動距離20,000mの摩耗試験後、以下に示す耐摩耗性の期待値をどの程度満足するかで評価することとした。</p> <p>① 中空コアロッド半径方向摩耗量の期待値; 0.025 mm (中空径の半径製品スバククの1/4)</p> <p>② 表面粗さの期待値; R(max) = 5.2~7.1 μm (6.3 s) (≒ATRバレット製品スバク)</p> <p>なおこの試験条件は、実際のMOX粉末より硬いバレットの硬さ(Hv=650)を模擬している(溶融シリカ)こと、ルブリカント剤を使用していないこと、時間の関係から摩耗速度について加速試験となっていること等、実際の成形条件と比べ、より保守的になっている。</p>	<p>(結果)</p> <p>(1) 中空コアロッド候補材料の寸法減量から見た耐摩耗性の優劣は、次の通り。 (劣) SKH51 < GH880R < AP1 ⇐ GA30 (優)</p> <p>(2) 中空コアロッド候補材料の表面粗さから見た耐摩耗性の優劣は、次の通り。なお、全ての条件で期待値を満足した。 (劣) GH880R < SKH51 < AP1 ⇐ GA30 (優)</p> <p>(3) プル第三開発室のもんじゅ燃料バレット成形回数、1ロット(約40kgMOX)で約21,000個程度である。AP1及びGA30-溶融シリカ-110kgf/mm²の場合、7~8ロットで摩耗が期待値に達すると推定される。AP1及びGA30-カーボンセラミックス-110kgf/mm²の場合、15~46ロットで摩耗が期待値に達すると推定される。</p> <p>GH880Rは、面圧110kgf/mm²の条件で異常摩耗を起こしており、採用にやや難がある。SKH51は、いずれの条件においても1~2ロットで摩耗が期待値に達すると推定される。</p> <p>(結論) 成形時の耐摩耗性の観点からは、中空コアロッド候補材料の中では、AP1とGA30が優れている。</p>

表4 成形装置、製造技術及び物性評価に関する開発の資料の概要 2 / 4

開発項目	試験項目等/資料分類等/発行者	資料番号	目的と概要	結論																											
	④ 中空コアロッド材料の疲労試験 資料分類等：試験計画書 発行者：石川島検査計測課	②-5	中空コアロッド用の材料を選定するために、候補材料を使用して回転曲げ疲労試験を実施して各材料の疲労特性を求め、選定のための資料を作成する。またこの材料の表面粗さ・太さの疲労特性への影響及びろう接部の疲労限度を求めるための試験を実施する。	<ul style="list-style-type: none"> 試験片形状：予備試験の結果、JIS Z2274 の2号試験片の砂時計型を基本に製作する。 材質：超硬合金 (AF1, GH80R, G5, GH96R, GA30)、高速度工具鋼 (SKH51) 試験機名称：小野式回転曲げ疲労試験機 																											
2. 製造技術に関する開発 2.1 粉末処理条件の立	① UO：造粒特性評価試験 (I) ①-1 パウダーテスタ試運転報告 資料分類等：E-シート 7M開-04-015 発行者：ブル開室 (野上、他)	②-6	ブル第一開発室 R-125室の既設のパウダーテスタの試運転により、得られたデータを基礎特性評価試験に反映させるものである。	<ul style="list-style-type: none"> パウダーテスタの測定項目によっては、最大600g (緩み見掛け比重=約2.4g/cc) であり、多くのパラメータを振る試験には適さない項目もある。しかしCarrの流動性指数で評価するには、全項目の測定が必要であり、少量でも測定できるように器具類を工夫する必要がある。 																											
	①-2 FBR 用中空ペレット造粒特性試験結果 資料分類等：E-シート 7M開-04-237 発行者：ブル開室 (宮本)	②-7	FBR 用中空ペレット造粒特性試験の結果から、造粒粉末の製造条件が、流動性、成形性、グリーン密度に与える影響を調べ、最適な造粒条件の検討・評価を行った。 本Eシートは、もんじゅ外側燃料の密度バラツキの原因解明に参考になると考え、速報として発行するものである。	<p>—バインダの添加量と焼結密度の関係について—</p> <ul style="list-style-type: none"> ① バインダ添加量が 0.5wt% から 1.0wt% に増加するに従ってペレットの密度が約 2~3% D 低下した。 ② ペレット金相写真からも、バインダ添加量 1.0wt% の方が、0.5wt% のペレットに比べて、ポアの部分が多い。 <p>以上の結果から、バインダの添加量が 0.5wt% から 1.0wt% に増加するにしたがってバインダとしての機能が大きく働いたと思われる。</p>																											
	①-2 UO：造粒特性評価試験 (I) 結果 (GPT) 資料分類等：報告書原稿 発行者：ブル開室 (宮本、野上)	②-8	<p>本試験は、造粒粉末の製造条件のうち、バインダ添加率、粗成形圧、分級サイズが、造粒粉末の流動性に与える影響を、UO粉末を用いて調べ、最適な造粒条件の検討・評価を行った。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>要因</th> <th>水準</th> <th>水準数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>バインダ添加量 (wt%)</td> <td>0.5, 1.0</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>粗成形圧 (tonf/cm²)</td> <td>1, 2, 3</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>分級サイズ (μm)</td> <td>212 ~ 425, 425 ~ 600, 600 ~ 850, 212 ~ 600, 425 ~ 850, 212 ~ 850</td> <td>6</td> </tr> </tbody> </table> <p>概略試験フロー (左→右) (S/V/V) (S/V/V) DUO:原料粉末 ⇒ 粉碎 ⇒ 統一混合 ⇒ バインダ添加 ⇒ 仮成形 ⇒ 解砕 (S/V/V) ⇒ 分級 ⇒ グリーンペレット検査 ⇒ 脱脂 ⇒ 焼結 ⇒ ペレット検査</p>	要因	水準	水準数	バインダ添加量 (wt%)	0.5, 1.0	2	粗成形圧 (tonf/cm ²)	1, 2, 3	3	分級サイズ (μm)	212 ~ 425, 425 ~ 600, 600 ~ 850, 212 ~ 600, 425 ~ 850, 212 ~ 850	6	<p>(1) 造粒粉の流動性評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ① バインダ添加率、仮成形圧、分級サイズの違いによる造粒粉の流動性に、差は生じなかった ② 粉末の流動性は、(低)原料粉<粉碎粉<造粒粉(高)となった。 ③ ボールミル粉碎により流動性が向上した。 <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>原料粉</th> <th>粉碎粉</th> <th>造粒粉</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>安息角</td> <td>余り良くない</td> <td>良好</td> <td>普通~かなり良好</td> </tr> <tr> <td>圧縮度</td> <td>不良</td> <td>かなり良好</td> <td>最も良好</td> </tr> <tr> <td>限界流出長さ</td> <td>30mm</td> <td>4mm弱</td> <td>1.5 ~ 4 mm ⇐ (参考値)</td> </tr> </tbody> </table> <p>(2) 造粒粉の充填性評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ① バインダ添加率、仮成形圧、分級サイズの違いによるUO：造粒粉のダイスへの充填性に、差は生じなかった。 		原料粉	粉碎粉	造粒粉	安息角	余り良くない	良好	普通~かなり良好	圧縮度	不良	かなり良好	最も良好	限界流出長さ	30mm	4mm弱
要因	水準	水準数																													
バインダ添加量 (wt%)	0.5, 1.0	2																													
粗成形圧 (tonf/cm ²)	1, 2, 3	3																													
分級サイズ (μm)	212 ~ 425, 425 ~ 600, 600 ~ 850, 212 ~ 600, 425 ~ 850, 212 ~ 850	6																													
	原料粉	粉碎粉	造粒粉																												
安息角	余り良くない	良好	普通~かなり良好																												
圧縮度	不良	かなり良好	最も良好																												
限界流出長さ	30mm	4mm弱	1.5 ~ 4 mm ⇐ (参考値)																												
	② UO：造粒特性評価試験 (II) (GPT-2) 資料分類等：報告書原稿 発行者：ブル開室 (宮本、野上)	②-9	<p>UO：造粒特性評価試験 (I) の追加試験として、中空ペレットと中実ペレットの製造リフレンスデータの取得を中心として、バインダ添加の有無、ボールミル処理の有無をパラメータとして試験を行った。</p> <p>また、(I) で原料粉をボールミル処理すると流動性が向上した点について、再現性を確認することとした。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>要因</th> <th>水準</th> <th>水準数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ペレット形状</td> <td>中空, 中実</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>バインダ添加量 (wt%)</td> <td>0, 0.5</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>ボールミル処理</td> <td>有, 無</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table> <p>概略試験フロー (左→右) (S/V/V) (S/V/V) DUO:原料粉末 ⇒ 粉碎 (有無) ⇒ バインダ添加 (有無) ⇒ 仮成形 ⇒ 解砕 (S/V/V) ⇒ 分級 ⇒ グリーンペレット検査 ⇒ 脱脂 ⇒ 焼結 ⇒ ペレット検査</p>	要因	水準	水準数	ペレット形状	中空, 中実	2	バインダ添加量 (wt%)	0, 0.5	2	ボールミル処理	有, 無	2	<p>(1) 中空ペレットと中実ペレットの製造性の相違について</p> <ul style="list-style-type: none"> ① UO：粉末においては、中空と中実の形状の違いによる差は、見られなかった。 ② UO：粉末においては、ボールミル処理を行った方が良い。 ③ UO：焼結ペレットでは、中空と中実の形状の違いによる外観上の差は、無かった。 ④ 中実より中空形状の方が成形圧が低く、スプリングバック率も低め、到達密度も低めであった。原因は形状の差によるものか、成形機運転上の差異であるのか判断ができなかった。 <p>(2) バインダ添加の効果について</p> <ul style="list-style-type: none"> ① UO：粉末においては、無バインダの場合、中実より中空の方がグリーンペレットの重量バラツキが大きく、焼結ペレットでも同様である。しかし、焼結ペレットの到達密度への影響は見られない。したがって、バインダ添加の有無による焼結ペレットの製造性に差は無い。 <p>(3) ボールミル処理と流動性の関係</p> <p>前回の試験 (I) で確認されたボールミル処理による粉末の流動性が再現されなかった。よって再現性良くボールミル処理による流動性向上を図るには、更に R & Dを重ねて条件を把握していかなければならない。</p> <p>しかし、ボールミル処理の有無に係わらず造粒操作をすることで、安定して流動性向上を図れることから、本件の追求はこれまでとする。</p>															
要因	水準	水準数																													
ペレット形状	中空, 中実	2																													
バインダ添加量 (wt%)	0, 0.5	2																													
ボールミル処理	有, 無	2																													
2.2 成形条件の確立 2.2.1 成形特性の把握	① MOX成形特性試験 (MGP) -LDP-3 工程確認試験含む-		<p>成形時において、成形孔に造粒粉を均一に充填することが必要であり、充填にバラツキが大きいと、焼結後のペレットの寸法、重量、密度のバラツキに原因になる。</p> <p>成形条件のうち、成形圧、ルブリカント添加率及び脱脂雰囲気水準にした試験を実施し、ペレット密度等に与える影響を調べた。</p> <p>なお本試験は常陽特燃 (B型特殊LDP-3燃料要素) 用ペレット製造の工程確認試験の一部として実施したため、成形条件のパラメータを詳細に振ることができなかった。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ① 焼結ペレットに焼き膨れが発生した。 ② 焼結ペレットにキャッピング、クラックが発生した。 ③ ルブリカント添加率0.6wt%が、0.2wt%に対し密度が高い。 <p>以上の結果より、焼き膨れに関しては、従来からの試験においてペレット中の炭素が離脱する際の影響であることが判明している。しかし、MOX成形特性試験(MGP) の場合は、炭素のみの影響とは言えない。それは、CO₂ガスを付いたペレットに発生したこと、ルブリカント添加率に着目する。</p>																											

表 4 成形装置、製造技術及び物性評価に関する開発の資料の概要 3 / 4

開発項目	試験項目等/資料分類等/発行者	資料番号	目的と概要	結論												
①-1 成形特性評価基礎試験 (中間結果) 資料分類等; 研究員会議資料 発行者; プル開室(宮本) ①-2 MOX成形特性評価試験(LDP-3含む)[MGP]の試験結果及び焼膨れ防止試験(MGP-2)試験計画 資料分類等; メモ(表紙はEシート) 発行者; プル開室(加藤直人)	②-10 ②-11	<p>②-10</p> <p>ペレット仕様: PuO₂富化度; 20±1% ペレット寸法; 外径 = φ7.32 ± 0.05 mm, 中空径 = φ1.8 ± 0.2 mm 高さ = H9.0 ± 1.0 mm</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>要因</th> <th>水準</th> <th>水準数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>成形圧力 (ton/cm²)</td> <td>2, 3</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>ルブリカント添加量 (wt%)</td> <td>0.2, 0.6</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>脱脂雰囲気</td> <td>CO₂, Ar-H₂ (5%)</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table> <p>概略試験フロー PuO₂粉末 } ⇒ 熱処理 ⇒ 粗混合 ⇒ 混合粉碎 ⇒ 圧力添加 ⇒ 仮成形 12%BUO₂粉末 } (S7V7) (S-6) (S7V7) NUO₂粉末 } (S7V7)</p> <p>⇒ 解砕 ⇒ 分級 ⇒ ルブリカント添加 ⇒ 成形 ⇒ 脱脂 ⇒ 焼結 ⇒ ペレット検査 ⇒ 研削 ⇒ ペレット検査</p>	要因	水準	水準数	成形圧力 (ton/cm ²)	2, 3	2	ルブリカント添加量 (wt%)	0.2, 0.6	2	脱脂雰囲気	CO ₂ , Ar-H ₂ (5%)	2	<p>と添加率が低い方にその傾向が顕著であることがある。このことから他の要因を推定すると、ボールミル粉碎による粉末の活性度の上昇が、大きく影響したものと思われる。よって、ボールミル混合時間及びボール径をパラメータとした追試が必要と思われる。</p> <p>次に焼結ペレットに発生したキャッピング、クラックについては、成形時の圧力の不均一性によって歪みが生じ、それが原因で発生したものと思われる。よって成形時の圧力分布の差を極力小さくするために、MGP よりも低圧(2, 3ton/cm²)に設定して試験する。</p>	
		要因	水準	水準数												
		成形圧力 (ton/cm ²)	2, 3	2												
ルブリカント添加量 (wt%)	0.2, 0.6	2														
脱脂雰囲気	CO ₂ , Ar-H ₂ (5%)	2														
<p>②-12</p> <p>MGPの結果を受けて、MGP-2では焼き膨れの第一要因として過粉碎が生じたと考え、混合粉碎の条件(ボール径、混合時間)をパラメータに試験を行った。 キャッピングに対しては、成形圧力(2tonf/cm², 3tonf/cm²)及びルブリカント添加率(0.2wt%, 0.6wt%)をパラメータとして試験を行った。 原料粉末の熱処理から造粒、分級での条件と焼結雰囲気については、過去の実績を踏まえ固定して行った。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>要因</th> <th>水準</th> <th>水準数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>混合粉碎</td> <td>φ4径 φ13mm × 4hr粉碎 φ4径 φ9~11mm × 2hr粉碎</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>ルブリカント添加量 (wt%)</td> <td>0.2, 0.6</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>成形圧力 (ton/cm²)</td> <td>2, 3</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>脱脂雰囲気</td> <td>CO₂, Ar-H₂ (5%)</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table> <p>概略試験フロー PuO₂粉末 } ⇒ 熱処理 ⇒ 粗混合 ⇒ 混合粉碎 ⇒ 圧力添加 ⇒ 仮成形 12%BUO₂粉末 } (S7V7) (S-6) (S7V7) NUO₂粉末 } (S7V7)</p> <p>⇒ 解砕 ⇒ 分級 ⇒ ルブリカント添加 ⇒ 成形 ⇒ 脱脂 ⇒ 焼結 ⇒ ペレット検査 ⇒ 研削</p>	要因	水準	水準数	混合粉碎	φ4径 φ13mm × 4hr粉碎 φ4径 φ9~11mm × 2hr粉碎	2	ルブリカント添加量 (wt%)	0.2, 0.6	2	成形圧力 (ton/cm ²)	2, 3	2	脱脂雰囲気	CO ₂ , Ar-H ₂ (5%)	2	<p>COGMA製PuO₂粉でも、ボールミルによる粉碎効果が大いとい、脱脂雰囲気はCO₂ガスでも焼き膨れを生じたが、混合粉碎条件をコントロールすることで、焼き膨れがなく且つPuスポットのないLDP-3仕様の燃料ペレットを製造することができた。</p> <p>また本試験で得た新しい知見の主なものを以下に示す。</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) Znの残量に関しては、脱脂雰囲気にCO₂ガスを用いた方が、Ar-H₂ガスと比べて残渣が多い。 (2) φ13mmのWCボールで粉碎混合を4時間したものの方が、φ9~11mmのWCボールで粉碎混合を2時間実施したものより、結晶粒径が大きい傾向がある。 (3) 脱脂雰囲気に着目すると、φ9~11mmのWCボールで粉碎混合を2時間実施したものについては、ルブリカント添加率に関係なく、CO₂ガスを用いたものがAr-H₂ガスを用いたものより結晶粒径が大きい。 (4) φ13mmのWCボールで粉碎混合を4時間したものについては、(3)と逆にAr-H₂ガスで脱脂した方が結晶粒径が大きい傾向にある。 <p>MGP及びMGP-2については、LDP-3の工程確認試験としての色彩が強く、途中から焼き膨れ防止対策中心となった。よって成形特性評価基礎試験としては、再度仕切り直しが必要であると考えられる。</p>
要因	水準	水準数														
混合粉碎	φ4径 φ13mm × 4hr粉碎 φ4径 φ9~11mm × 2hr粉碎	2														
ルブリカント添加量 (wt%)	0.2, 0.6	2														
成形圧力 (ton/cm ²)	2, 3	2														
脱脂雰囲気	CO ₂ , Ar-H ₂ (5%)	2														
2.2.2 成形メカニズムによる成形特性の解析・評価	② 粉末圧縮試験器の設計・製作・設置 資料分類等; 発注仕様書 発行者; プル開室(野上)	②-13	<p>次に示す各種粉末の圧縮特性を精度良く求めるための試験器を設計・製作した。①圧粉体の側圧係数、②圧粉体のスプリングバック率、③円筒容器と圧粉体間の壁面摩擦係数。</p>													

表4 成形装置、製造技術及び物性評価に関する開発の資料の概要 4 / 4

開発項目	試験項目等/資料分類等/発行者	資料番号	目的と概要	結論																																																																															
3. 物性評価に関する開発 3.1 粉末流動性評価手法確立	① 粉末流動性評価手法確立試験 ①-1 MOX粉末流動性評価方法の開発 (全体概要) 資料分類等; E-ノート 7M開-05-205 発行者; プル開室 (宮本)	②-14	MOXペレットを製造する上で、造粒粉末の性状と流動性との関係について、物理的に意味があり、定量的に評価する手法の確立を目指す。このため、粉末流動性評価方法の開発の現状及びその開発計画についてまとめた。 1. 動燃内での開発の現状 (1) プル工場製造課、核開部プル開室; カサ密度(g/cc)、タップ密度(g/cc)及び圧縮度、パウダーテスタによるCarrの流動性指数 (2) プル工場転換課; 安息角 2. 他の業界での開発の現状 パウダーテスタによるCarrの流動性指数、パウダーベッドテスタによる粉体力学物性測定法、金属粉の流動度試験法 3. 動燃での今後の開発計画 次の装置は、中空ペレット製造技術開発の粒子力学特性評価の一環として MOX試験まで実施する。 パウダーベッドテスタによる粉体力学物性測定法、金属粉の流動度試験法																																																																																
	①-2 各種粉末の安息角測定結果 資料分類等; 調査メモ 発行者; プル開室 (野上)	②-15	①-2 各種粉末の安息角測定結果	①-3 高活性粉末について																																																																															
	①-3 高活性粉末について 資料分類等; 会議配布資料 発行者; 三菱マテリアル	②-16	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">No.</th> <th rowspan="2">粉末名称</th> <th rowspan="2">粉末製造者</th> <th colspan="3">安 測 角</th> <th rowspan="2">備 考</th> </tr> <tr> <th>測定結果</th> <th>流動性の程度</th> <th>測定者</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>現行UO₂粉末</td> <td>三菱マテリアル</td> <td>60°</td> <td>不良</td> <td>三菱マテリアル</td> <td rowspan="3">n = ?</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>マイクロ波脱脂粉</td> <td>同</td> <td>55°</td> <td>あまり良くない</td> <td>同</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>高活性粉</td> <td>同</td> <td>35°</td> <td>良好</td> <td>同</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>燃料劣化ウラン (LIU-001) ①原料粉 ②原料粉→熱処理後 ③原料粉→ネーブル後 ④原料粉→熱処理→バインダ添加 ⑤原料粉→ネーブル→バインダ添加後 ⑥原料粉→バインダ添加後</td> <td>日本核燃料コルパジョン (JCO)</td> <td>48° 49° 55° 42° 40° 35°</td> <td>あまり良くない あまり良くない あまり良くない 普通 かなり良好 良好</td> <td>PNC 核開部 7M開室</td> <td>H 5年10月測定 n = 1 H 5年11月測定 n = 1</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>脱硝MOX粉末</td> <td></td> <td>46°</td> <td>あまり良くない</td> <td></td> <td>n=3 S52年測定</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>焙還MOX粉末</td> <td>動燃東海</td> <td>49°</td> <td>あまり良くない</td> <td>PNC Pu工場 転換課</td> <td>n=2</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>粉碎MOX粉末</td> <td>(PNC)</td> <td>48°</td> <td>あまり良くない</td> <td></td> <td>n=3</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>製品MOX粉末</td> <td></td> <td>46°</td> <td>あまり良くない</td> <td></td> <td>n=2</td> </tr> </tbody> </table>	No.	粉末名称	粉末製造者	安 測 角			備 考	測定結果	流動性の程度	測定者	1	現行UO ₂ 粉末	三菱マテリアル	60°	不良	三菱マテリアル	n = ?	2	マイクロ波脱脂粉	同	55°	あまり良くない	同	3	高活性粉	同	35°	良好	同	4	燃料劣化ウラン (LIU-001) ①原料粉 ②原料粉→熱処理後 ③原料粉→ネーブル後 ④原料粉→熱処理→バインダ添加 ⑤原料粉→ネーブル→バインダ添加後 ⑥原料粉→バインダ添加後	日本核燃料コルパジョン (JCO)	48° 49° 55° 42° 40° 35°	あまり良くない あまり良くない あまり良くない 普通 かなり良好 良好	PNC 核開部 7M開室	H 5年10月測定 n = 1 H 5年11月測定 n = 1	5	脱硝MOX粉末		46°	あまり良くない		n=3 S52年測定	6	焙還MOX粉末	動燃東海	49°	あまり良くない	PNC Pu工場 転換課	n=2	7	粉碎MOX粉末	(PNC)	48°	あまり良くない		n=3	8	製品MOX粉末		46°	あまり良くない		n=2	<p>表 本試験で用いたUO₂粉末の物性値</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>粉末製造プロセス</th> <th>新70t^a</th> <th>UO₂P₂O₅系ADU法</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>比表面積 (m²/g)</td> <td>10.3 (4-12)</td> <td>2.2</td> </tr> <tr> <td>かさ密度 (g/cc)</td> <td>1.5 (1.1-1.8)</td> <td>1.5</td> </tr> <tr> <td>平均粒径 P_{ss5} (μm)</td> <td>0.5 (0.3-1.0)</td> <td>0.6</td> </tr> <tr> <td>安息角</td> <td>35</td> <td>46</td> </tr> </tbody> </table> <p>*かっこ付き数字は新プロセスで製造される粉末の物性値の範囲</p> <p>図 高性能UO₂粉末の製造フロー (以下新プロセスと呼ぶ)</p>	粉末製造プロセス	新70t ^a	UO ₂ P ₂ O ₅ 系ADU法	比表面積 (m ² /g)	10.3 (4-12)	2.2	かさ密度 (g/cc)	1.5 (1.1-1.8)	1.5	平均粒径 P _{ss5} (μm)	0.5 (0.3-1.0)	0.6	安息角	35	46
No.	粉末名称	粉末製造者	安 測 角				備 考																																																																												
			測定結果	流動性の程度	測定者																																																																														
1	現行UO ₂ 粉末	三菱マテリアル	60°	不良	三菱マテリアル	n = ?																																																																													
2	マイクロ波脱脂粉	同	55°	あまり良くない	同																																																																														
3	高活性粉	同	35°	良好	同																																																																														
4	燃料劣化ウラン (LIU-001) ①原料粉 ②原料粉→熱処理後 ③原料粉→ネーブル後 ④原料粉→熱処理→バインダ添加 ⑤原料粉→ネーブル→バインダ添加後 ⑥原料粉→バインダ添加後	日本核燃料コルパジョン (JCO)	48° 49° 55° 42° 40° 35°	あまり良くない あまり良くない あまり良くない 普通 かなり良好 良好	PNC 核開部 7M開室	H 5年10月測定 n = 1 H 5年11月測定 n = 1																																																																													
5	脱硝MOX粉末		46°	あまり良くない		n=3 S52年測定																																																																													
6	焙還MOX粉末	動燃東海	49°	あまり良くない	PNC Pu工場 転換課	n=2																																																																													
7	粉碎MOX粉末	(PNC)	48°	あまり良くない		n=3																																																																													
8	製品MOX粉末		46°	あまり良くない		n=2																																																																													
粉末製造プロセス	新70t ^a	UO ₂ P ₂ O ₅ 系ADU法																																																																																	
比表面積 (m ² /g)	10.3 (4-12)	2.2																																																																																	
かさ密度 (g/cc)	1.5 (1.1-1.8)	1.5																																																																																	
平均粒径 P _{ss5} (μm)	0.5 (0.3-1.0)	0.6																																																																																	
安息角	35	46																																																																																	
<p>〔出典〕No.4-①~④: UO₂造粒特性評価試験 (H 5年10月) No.4-④~⑥: UO₂造粒特性追加試験 (H 5年11月) No.5~8 : PNC I8410 90-011 (1990年3月) 「MOX粉の安息角測定報告」 注) 流動性の程度: 安息角のみで添付表6.3 「粉体の流動性と噴流指数」の表より読み取った流動性の程度であり、4つの測定法 (安息角、圧縮角、7M₁角、均一度) のうちから求まる流動性の程度と異なる恐れがあることを了解願いたい。</p>																																																																																			

表5 S53年度～H2年度における中空ペレット製造の実績工程

照射燃料製造等	キャンペーン名等	昭和53年度 (1978)	昭和54年度 (1979)	昭和55年度 (1980)	昭和56年度 (1981)	昭和57年度 (1982)	昭和58年度 (1983)	昭和59年度 (1984)	昭和60年度 (1985)	昭和61年度 (1986)	昭和62年度 (1987)	昭和63年度 (1988)	平成元年度 (1989)	平成2年度 (1990)	資料 番号	備 考	
開発項目	試験項目																
照射燃料製造等	キャンペーン名等																
1. Pu第一開発室における中空ペレット燃料製造実績	1.1 HALDEN IFA-514 (実証炉燃料の先行試験)		発行 [報告書No. N841-79-88 「軽水炉用」7#炉用富化燃料のHWR照射試験 IFA-514 燃料集合体の製作]														
	1.2 INTA-1 (常陽特燃)							製造 ●→●	発行 [報告書No. PNC ZN8430-86-07 「常陽計装線付C II型特殊燃料要素の製造記録」]								
	INTA-2 中空径のパラツキが製品密度に及ぼす影響について (野上嘉能)														③-1	INTA-2中空径のパラツキが製品密度に及ぼす影響	
	1.3 PWR-Puサーマル (IFA-554, 555)																
	1.4 INTA-2 (常陽特燃)													製造 ●→●			
	1.5 LDP-3 (常陽特燃)																①参照
	1.6 IFA-590																①参照
2. FBR燃料中空ペレットの製造試験報告 (横内、衣笠、山本(純太)、雲、鈴木(満)、茂呂)	2. FBR燃料中空ペレットの製造試験報告							●→	[報告書No. PNC ZN843-84-02 「FBR燃料用中空ペレットの製造試験報告」]						③-2	PNC ZN843-84-02	
	3. Pu第一開発室における中空ペレットの製造経緯について (中島増雄)														③-3	設開-63-383	
	2.1 BWR Puサーマル用中空MOXペレットの製造試験 (佐藤政一、照沼直利、青木義一、佐久間民夫、助川宣夫、蛭町秀、村上隆)									●→●	[報告書No. PNC ZN841-85-50 「BWR Puサーマル用中空MOXペレットの製造試験」]				③-5	PNC ZN841-85-50	
敦賀MOX燃料のペレット中心空孔周辺部の欠損について (加藤正人)															③-6	7#開-04-074	

表6 中空ペレット製造実績の資料の概要 1/2

開発項目	試験項目等/資料分類等/発行者	資料番号	目的と概要	結論																																															
1. Pu第一開発室における中空ペレット燃料製造、試験実績	1.2.1 INTA-2 中空径のバラツキが製品密度に及ぼす影響について 資料分類等;メモ(表紙はEシート) 発行者;プル工場製造課	③-1	INTA-2 使用前検査要領書の検討打合せで調査報告することになったINTA-2 中空径のバラツキが製品密度に及ぼす影響について、報告する。 製造した中空ペレット1ロット(60個)について全数測定を行い、次にこの全数の中から10個ずつ2回に分けて測定を行った。 これらの結果を母平均に関する推定(σ既知)で判定したところ、危険率1%でも差x-μは有意でないことが分かった。	(1) 検査時の中空径測定 検査時においては、10個を抜き取り、その平均値を用いることは、何ら問題が無い。また、抜き取りでも中空径の保証は、寸法公差から±3σを採ることにより、十分保証できる。 (2) 密度に対する影響 中空径がペレット密度に与える影響としては、この10個の平均値を使うことにより、1σで約±0.04%、3σを取っても約±0.12%であり、密度のスペックの±2%に対して十分小さい。																																															
	2. FBR中空ペレットの製造試験報告 資料分類等;PNC ZN843-84-02 発行者;プル開室(横内洋二、衣笠宇、山本純太、雪隆司、鈴木満、茂呂清隆)	③-1	FBR燃料として従来の低密度の中実ペレットに代る、高密度の中実ペレットの開発が考えられていた。しかし、対象とする燃料ペレットは約φ5.4mmの外径に対し、約φ2mmの中実部を有する構造となるため、以下の様な問題点があった。 ① 成形時のダイス強度 ② 自動連続成形時の粉末充填性 ③ ペレットのL/D比がどこまでとれるか ④ ペレットの肉厚が薄くなるための焼成時の変形率の増加 このため、FBR燃料用中空ペレットの量産製造のための成形技術の確証試験を行った。 一軸乾式金型成形機(ヨシヅカ社製PCH-15SU型)を用いて、量産時と同様の自動充填機構により、FBRタイプの中実ペレットの成形試験を行い、左記の結論を得た。	現有の乾式金型成形による中空ペレットの量産製造について、内径の限界、L/Dの限界等を試験してきた。検討結果を総括し以下に示す。 ① φ2mmのコアロッドを用いてφ1.7mmの中実径を有する焼結ペレットは量産が可能である。しかし、手動充填による少量の試験製造ならば、約φ0.9mmまでの中空径が製造可能である。又、ペレットのL/D比は最大で3である。 ② 充填、加圧時の粉末流動性がポイントとなるため、造粒処理はより厳しい管理が必要である。 ③ ルブリカント及びバインダは中実ペレット成形よりも多く添加する必要がある。又、現行のK-3よりも難型効果・結合効果の高い有機材を調査する必要がある。 ④ コアロッドの設計にあたっては、座屈限界値を考慮して形状を決めると共に、その材質は靱性の高い素材が良い。																																															
3. Pu第一開発室における中空ペレットの製造試験について 資料分類等;設開-63-383 発行者;設計開発課(中島増雄)			(目的) 「常陽」MK-Ⅲ炉心計画に対する設開課としての対応の一環として、中空ペレットの量産性を検討する。ここでは、その第一ステップとして、Pu-1における中空ペレットの製造試験について明らかにする。 (結論) 1. 過去に若干の製造試験、燃料製造を実施し、中空ペレット製造に関する基礎的知見を得ている。(量産は可能と判断されている) 2. しかし、FBRタイプ中空ペレットの大量生産の実証例はない。 3. 製造実績について右表にまとめる。	<table border="1"> <thead> <tr> <th>キャンペーン名</th> <th>実施時期</th> <th>原料粉</th> <th>ペレット外径/mm</th> <th>ペレット内径/mm</th> <th>製造量</th> <th>主な結果など</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>HALDEN IFA-514 (実証燃料の先行試験)</td> <td>1977</td> <td>6%PuO₂</td> <td>φ10.6</td> <td>φ3.5 φ1.8</td> <td>約300個</td> <td>・MOX中空としては初の試み(成形法での) ・当時の炉心構成に多少の手を加えるだけで大量生産できた。 ・FBRタイプも製造可能</td> </tr> <tr> <td>FBR燃料用中空ペレットの量産製造試験</td> <td>1983</td> <td>UO₂</td> <td>φ5.2</td> <td>φ0.85 φ1.7</td> <td>約50個</td> <td>・L/D比はmax.3 ・ルブリカントを多くし、造粒管理を厳しくした。 ・中空径1.7φなら量産できる。 ・コアロッドは高速度鋼が良い。</td> </tr> <tr> <td>INTA (常陽計装線付C型特) 性燃料要素の製造</td> <td>1984</td> <td>30%PuO₂</td> <td>φ5.4</td> <td>φ1.9</td> <td>MOX 200個 UO₂ 数個</td> <td>・中空は中実より密度が上がりやすい。 ・ルブリカントを多くした。</td> </tr> <tr> <td>PWR プルサーマル</td> <td>1986</td> <td>6% 10%PuO₂</td> <td>φ8.2</td> <td>φ1.9</td> <td>約50個</td> <td>(・報告書に技術上の記載なし)</td> </tr> </tbody> </table>	キャンペーン名	実施時期	原料粉	ペレット外径/mm	ペレット内径/mm	製造量	主な結果など	HALDEN IFA-514 (実証燃料の先行試験)	1977	6%PuO ₂	φ10.6	φ3.5 φ1.8	約300個	・MOX中空としては初の試み(成形法での) ・当時の炉心構成に多少の手を加えるだけで大量生産できた。 ・FBRタイプも製造可能	FBR燃料用中空ペレットの量産製造試験	1983	UO ₂	φ5.2	φ0.85 φ1.7	約50個	・L/D比はmax.3 ・ルブリカントを多くし、造粒管理を厳しくした。 ・中空径1.7φなら量産できる。 ・コアロッドは高速度鋼が良い。	INTA (常陽計装線付C型特) 性燃料要素の製造	1984	30%PuO ₂	φ5.4	φ1.9	MOX 200個 UO ₂ 数個	・中空は中実より密度が上がりやすい。 ・ルブリカントを多くした。	PWR プルサーマル	1986	6% 10%PuO ₂	φ8.2	φ1.9	約50個	(・報告書に技術上の記載なし)												
キャンペーン名	実施時期	原料粉	ペレット外径/mm	ペレット内径/mm	製造量	主な結果など																																													
HALDEN IFA-514 (実証燃料の先行試験)	1977	6%PuO ₂	φ10.6	φ3.5 φ1.8	約300個	・MOX中空としては初の試み(成形法での) ・当時の炉心構成に多少の手を加えるだけで大量生産できた。 ・FBRタイプも製造可能																																													
FBR燃料用中空ペレットの量産製造試験	1983	UO ₂	φ5.2	φ0.85 φ1.7	約50個	・L/D比はmax.3 ・ルブリカントを多くし、造粒管理を厳しくした。 ・中空径1.7φなら量産できる。 ・コアロッドは高速度鋼が良い。																																													
INTA (常陽計装線付C型特) 性燃料要素の製造	1984	30%PuO ₂	φ5.4	φ1.9	MOX 200個 UO ₂ 数個	・中空は中実より密度が上がりやすい。 ・ルブリカントを多くした。																																													
PWR プルサーマル	1986	6% 10%PuO ₂	φ8.2	φ1.9	約50個	(・報告書に技術上の記載なし)																																													
4. 高速実験炉「常陽」照射用炉心特殊燃料要素 B型試験用集合体(LDP-3) 特殊燃料要素製造報告 資料分類等;PNC PN8410 94-224 発行者;(プル開室)飯村直人、小幡真一、豊島光男、飛田典幸、野上嘉能、小沼勝弘、井坂和彦 (プル工場検査課) 深川節男、中島勝昭、宮内正美、梶谷幹男	③-4		本報告書は、「常陽」運転工程第29サイクルから照射開始予定のB型試験用集合体(B9)に装荷するLDP-3特殊燃料要素の製造、加工における諸データを整理、収録したものである。燃料ビン外径はφ8.5mmであり、これまでの太径ビン照射試験(LDP-1、2試験)でのφ7.5mmに比べて大型炉心燃料仕様により近い形状になっている。また、中空ペレットを用いての初めての本格的な照射試験であることも大きな特徴である。さらに被覆管材の一つとして用いられるオーステナイト系ステンレス鋼(PNC1525)については、燃料ビンで初めての照射となる。 ペレット製造に使用した原料粉末及び製造仕様の一部を示す。	製造仕様を満足するペレットを製造することができた。以下にペレットの製造仕様及び製品ペレットの測定結果を示す。 これらの結果から、中空径は公差幅0.4mmに対して、σで0.006mmと1.5%に過ぎず、極めて小さい。よって、実機大量生産時の検査としては、抜取検査または無検査による対応が可能であると考える。																																															
			<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">ペレットの種類</th> <th colspan="2">原料粉末</th> <th rowspan="2">ウラン濃縮度</th> <th rowspan="2">製造元</th> </tr> <tr> <th>種類</th> <th>ロットNo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">燃料ペレット(8)</td> <td>PuO₂粉末</td> <td>237</td> <td rowspan="3">約1.2% 約0.7%</td> <td rowspan="3">COGEMA JCO</td> </tr> <tr> <td>濃縮ウラン粉末</td> <td>FU-11-35</td> </tr> <tr> <td>天然ウラン粉末</td> <td>FC3-11</td> </tr> <tr> <td>熱遮断ペレット(6)</td> <td>劣化ウラン粉末</td> <td>LIU003</td> <td>約0.2%</td> <td>JCO</td> </tr> </tbody> </table>	ペレットの種類	原料粉末		ウラン濃縮度	製造元	種類	ロットNo	燃料ペレット(8)	PuO ₂ 粉末	237	約1.2% 約0.7%	COGEMA JCO	濃縮ウラン粉末	FU-11-35	天然ウラン粉末	FC3-11	熱遮断ペレット(6)	劣化ウラン粉末	LIU003	約0.2%	JCO	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">ペレットの種類</th> <th rowspan="2">項目</th> <th rowspan="2">製造仕様値</th> <th colspan="2">製品ペレット測定結果</th> <th rowspan="2">【参考】 中空径測定条件等</th> </tr> <tr> <th>平均値</th> <th>標準偏差σ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">燃料ペレット(8)</td> <td>外径(mm)</td> <td>φ7.32 ± 0.05</td> <td>φ7.342</td> <td>0.001</td> <td rowspan="4">測定器;ポアテスタ n=500 (X=250 Y=250 D_{max.}=φ1.779 D_{min.}=φ1.747)</td> </tr> <tr> <td>中空径(mm)</td> <td>φ1.8 ± 0.2</td> <td>φ1.761</td> <td>0.006</td> </tr> <tr> <td>高さ(mm)</td> <td>H 9.0 ± 1.0</td> <td>H 9.218</td> <td>0.130</td> </tr> <tr> <td>密度(XT.D.)</td> <td>95 ± 2</td> <td>93.65</td> <td>0.17</td> </tr> </tbody> </table>	ペレットの種類	項目	製造仕様値	製品ペレット測定結果		【参考】 中空径測定条件等	平均値	標準偏差σ	燃料ペレット(8)	外径(mm)	φ7.32 ± 0.05	φ7.342	0.001	測定器;ポアテスタ n=500 (X=250 Y=250 D _{max.} =φ1.779 D _{min.} =φ1.747)	中空径(mm)	φ1.8 ± 0.2	φ1.761	0.006	高さ(mm)	H 9.0 ± 1.0	H 9.218	0.130	密度(XT.D.)	95 ± 2	93.65	0.17
ペレットの種類	原料粉末		ウラン濃縮度		製造元																																														
	種類	ロットNo																																																	
燃料ペレット(8)	PuO ₂ 粉末	237	約1.2% 約0.7%	COGEMA JCO																																															
	濃縮ウラン粉末	FU-11-35																																																	
	天然ウラン粉末	FC3-11																																																	
熱遮断ペレット(6)	劣化ウラン粉末	LIU003	約0.2%	JCO																																															
ペレットの種類	項目	製造仕様値	製品ペレット測定結果		【参考】 中空径測定条件等																																														
			平均値	標準偏差σ																																															
燃料ペレット(8)	外径(mm)	φ7.32 ± 0.05	φ7.342	0.001	測定器;ポアテスタ n=500 (X=250 Y=250 D _{max.} =φ1.779 D _{min.} =φ1.747)																																														
	中空径(mm)	φ1.8 ± 0.2	φ1.761	0.006																																															
	高さ(mm)	H 9.0 ± 1.0	H 9.218	0.130																																															
	密度(XT.D.)	95 ± 2	93.65	0.17																																															

表6 中空ペレット製造実績の資料の概要 2 / 2

開発項目	試験項目等/資料分類等/発行者	資料番号	目的と概要			結論				
			仕様項目	燃料ペレット(8)	熱遮蔽ペレット(6)	ペレットの種類	項目	製造仕様値	製品ペレット測定結果	
			核分裂性物質含有率 (wt%)	17.6 ± 1.0	-	ペレットの測定結果 熱遮蔽ペレット(6) 外径 (mm) φ 7.32 ± 0.05 中空径 (mm) φ 1.8 ± 0.2 高さ (mm) H12.0 ± 1.0 密度(X.T.D.) 95 ± 2	平均値	標準偏差σ	【参考】 中空径測定条件等 測定器：ポアテスタ n=24 (X=12, Y=12) D _{max} = φ 1.792 D _{min} = φ 1.725	
			プルトニウム富化度 (wt%)	2.0 ± 1	-		φ 7.340	0.002		
			ウラン濃縮度 (wt%)	約 5	0.2 ± 0.1		φ 1.734	0.013		
			ウラン含有率 (wt%)	-	≥ 87.8		H12.158	0.047		
			酸素含有率 (O/M比)	1.98 ^{0.02} _{0.03}	2.00~2.02		94.82	0.07		
			① 成形に使用した金型の寸法；パンチ外径=φ8.60mm, 中空コアロッド外径=φ2.03mm ② 燃料ペレットの中空径は、一つのペレットの中心位置（高さ方向）にポアテスタを挿入し、任意のX方向及びこれと直交するY方向を1か所ずつ測定・記録したものである。							
2. ATRラインにおける中空ペレット燃料製造実績	2.1 BWR Puサーマル用中空MOXペレットの製造試験 資料分類等；PNC ZN 841 85-50 発行者；プル工場製造課 (村上政一、照沼直利、青木義一、佐久間民夫、助川宣夫、蛭町秀、村上隆)	③-5	動燃事業団と日本原子力発電(株)の共同研究によるPuサーマル計画が実施されることになった。このうちペレット製造はプルトニウム燃料第2開発室ATRラインで行われることになり、成形条件及び焼結性を把握するため製造試験を実施した。 ATRラインにおいても中空ペレット製造の経験は過去に試験的に行われたことはあるが、十分な情報を得られるものではなかった。このため「ふげん」取替用燃料ペレット製造の経験や過去の報告書の情報に基づき、「量産」を目的とした中空ペレットの製造試験を計画・実施した。 製造試験は次の3段階で実施した。 試験Ⅰ 成形試験(UO ₂ 試験) 「ふげん」第11次取替用燃料ペレット製造の断熱ペレット用粉末を用い、成形における造粒工程追加の必要性の有無及びペレットの成形・焼結性の把握を目的とする。 試験Ⅱ 成形性確認試験(MOX試験) 「ふげん」第11次取替用燃料ペレットの製品ロット№A6-11021、22の粉末の一部を用いて、試験Ⅰの結果を参考に成形条件の把握を行った。 試験Ⅲ 本番先行試験			教質1号炉用中空MOXペレット製造に先立つ、成形工程に主眼をおいた製造試験をATRペレット製造ラインで実施した。この結果以下の知見が得られた。 ① 成形金型への粉末充填の際、粉末の流動性、充填性、圧縮性は、既設のボールミル装置で粉碎混合した粉末で成形が可能であり、成形工程の前に造粒工程を入れる必要はない。また無造粒粉末と造粒粉末で製造したペレットの焼結密度に差はなく、焼結ペレットの外径径は無造粒粉末を用いたペレットの方が小さい(約25μm)。金相も無造粒粉末を用いたものの方が造粒痕が少ない。 ② グリーンペレットの成形圧が2.0tonf/cm ² 以下であると欠けを生じ易くなる。逆に4.5tonf/cm ² 以上の成形圧ではキャッピングを生じ易くなる。 グリーンペレットにある程度の強度を持たせ、かつキャッピングの発生を小さくさせるためには2.5~3.5 tonf/cm ² の成形圧が最適である。 ③ PuO ₂ の均一性、金相は同一粉末を用いた場合、中空ペレットと中実ペレットでは差はない。 ④ 同一成形圧で成形した場合、中空ペレットの方が中実ペレットより欠け易い。 ⑤ 中空MOXペレットはATRラインで量産製造可能であり、製造されたペレットは全項目について仕様を満足した。 ⑥ 量産製造したペレットの1700℃、24hr再焼結における密度上昇は0.64%T.Dであり、外径の収縮は20μm(収縮率で0.2%)であった。 なお、中空部の寸法変化はほとんど見られなかった。				
	教質MOX燃料のペレット中心空孔周辺部の欠損について 資料分類等；プル開-04-074 発行者；プル開室(加藤正人)	③-6	教質で照射したMOX燃料中空ペレットが、中心空孔周辺において欠損していることが大洗工学センター燃材部の照射後試験で確認された。 この欠損原因と欠損の照射時に及ぼす影響について検討を行った。また、欠損原因の可能性を考察したので報告する。			次の3つの項目について検討及び考察を行った。 1. 欠損状態 ペレットの欠損は、中心空孔周辺部において高富化及び中富化ペレットにおいて現れている。ペレットが欠損した時期として、(1)照射前の輸送中、(2)照射中、(3)照射後の輸送中、及び(4)PIB試料準備中の4つについて検討した。その結果、照射中に欠損した可能性が最も高いと考えられる。 2. 中空ペレット燃料の中心空孔周辺部の欠損原因に関する一考察 照射後試験のデータ及び製造時データについて検討を行った。以下の3つが欠損に関係すると仮定し、欠損原因について考察した。 (1) ペレット欠損は、燃焼度または線出力密度に対して、しきい値が存在する。 (2) Pu富化度が高いほど、または欠損量が多いほどF Pガス放出率が高い。 (3) 結晶粒径が小さいほど欠損量が多い。(欠損がない燃料の1/3の大きさである。) 粒内に生成したF Pガス元素を考えると結晶粒径が小さいほどF Pガスが粒界に集まりやすく、結晶粒界でのポイドの成長が速い。結晶粒が小さい程、F Pガスのポイドの成長により結晶粒界に歪を与え、欠損し易くなったと考えることができる。しかし欠損原因としては、他にも要因が考えられ、複数の要因が複雑に絡み合っているため、この欠損原因を手持ちのデータだけで簡単に理解する事は難しい。今後、燃料の照射挙動を理解するためにも、結晶粒径、Puスポット、開孔率などを制御して燃料製造を行う必要がある。 3. ペレット欠損の照射時に及ぼす影響 照射時に及ぼす影響は以下の5つが考えられる。 (1) 燃料ピンの熱分布の変化 (2) F Pガス放出率の上昇 (3) ペレット中心温度の上昇 (4) 中性子フラックス分布の変化 (5) P C M 1の増加 なお、本燃料は、プル燃第2開発室ATRラインで1985年に製造したものである。				

表7 これまでの中空ペレット製造技術開発で得られた知見と今後の課題 (1/2)

開発課題	得た知見	結果	得られた知見	今後の課題
1. 成形装置に関する課題	(I) 中空コアロッドの開発 ① 形状、寸法設計及び試作 (イ) 座屈強度評価による材料、形状、寸法の設計評価	① 形状、寸法設計及び試作 (イ) 座屈強度、破壊靱性、抗折力などの材料強度、疲労強度、耐摩耗性等の耐久性、使用実績の観点から超硬合金 (AF1, G5, GH880R, GH96R) 及び高速度工具鋼 (SKH51) を選定した。 プレス用として座屈強度の強い形状、寸法の中空コアロッドを設計した。 試作ロッドの形状・寸法をモデリングした座屈強度解析の結果、超硬合金の場合はロッド径 $\geq \phi 1.5\text{mm}$ 、高速度工具鋼の場合はロッド径 $\geq \phi 2.0\text{mm}$ であれば座屈しないことが判った。(但し側圧係数 $m=1/3$ 、壁面摩擦係数 $\mu=0.1$ と仮定したときの評価)	① 形状、寸法設計及び試作 (イ) 中空コアロッドは、超硬合金の場合 $\phi 1.5\text{mm}$ 以上(高速度工具鋼の場合 $\phi 2.0\text{mm}$ 以上)の直径で、且つ応力集中しにくい形状(形状係数 α_x を1.1~1.3程度)とすれば座屈しない。 (但し側圧係数 $m=1/3$ 、壁面摩擦係数 $\mu=0.1$ と仮定した場合の評価) 座屈強度、抗折力の観点から評価すると、選定鋼種の中ではAF1が一番優れている。 破壊靱性の観点から評価すると、選定鋼種の中ではSKH51が一番優れている。	1-1 粉末圧縮試験器をグローブボックスに新設し、MOX粉末及びUO ₂ 粉末を用いて成形時に中空コアロッドに働く応力を測定し、側圧係数 m および壁面摩擦係数 μ の値を求める。 1-2 側圧係数 m 、壁面摩擦係数 μ 及び疲労試験結果が揃った時点で、強度評価の再評価と最適中空コアロッド材料の選定を行う。
	(ロ) 試作による設計実現性の確認	(ロ) 設計したものが実際に製作できることを確認した。	(ロ) 選定鋼種で $\phi 1.0\sim\phi 2.5\text{mm}$ の中空コアロッドを製作できる。	
	(ハ) MOX粉末成形時に中空コアロッドに働く応力の測定による座屈応力の評価⇒中空コアロッド設計の妥当性の確認	(ハ) 中空コアロッドに働く応力を測定する装置を設計製作した。	-	
	② 選定材料の耐久性評価 (イ) 耐摩耗性(摩耗量、表面粗さ) 目標・材料間での相対的な優劣は? ・試験目標回数 $\geq 1 \times 10^6$ 回の性能を有しているか? ・Pu-3実績から $\geq 2 \times 10^6$ 回の性能見た実用上の成形成績回数(約10集合体分)を有しているか?	② 選定材料の耐久性評価 (イ) 摩耗試験 (a) 摩耗量の点では、いずれも成形回数 $\leq 1 \times 10^6$ 回であったがAF1(14~32万回)とGA30(17~100万回、現在Pu-1, Pu-3の中実金型用に使用実績有り)が相対的に優れていた PNC TN8410 96-214 (b) 表面粗さの点では、成形回数 $= 1 \times 10^6$ 回において、いずれもATRペレットの表面粗さスペックを満足した。	② 選定材料の耐久性評価 (イ) 摩耗試験 試験の実施鋼種(AF1, GH880R, GA30, SKH51)のうち、AF1(超微粒超硬合金)とGA30(中粒超硬合金、G5と同種鋼でこれまでPu-1, Pu-3で金型に使用してきた鋼種)の耐摩耗性(摩耗量、表面粗さ)は、ほぼ目標値に達している。	
(ロ) 疲労試験 { 同 上 }	(ロ) 疲労試験 現在、疲労試験を実施中である。H8年9月頃に結果が出る予定である。	-		
2. 製造技術に関する課題	(I) 粉末処理条件(造粒特性)の把握 ① 充填性の良い(⇔流動性の良い)造粒粉の製造条件の把握	① 充填性の良い(⇔流動性の良い)造粒粉の製造条件 (イ) UO ₂ 粉を用いた造粒特性評価試験の結果 (a) バインダ添加率(0.5, 1.0%)、仮成形圧(1, 2, 3tonf/cm ²)、分級サイズ(212~425, 425~600, 600~850, 212~600, 425~850, 212~850 μm)の範囲では、造粒粉の流動性*に差は見られなかった。	① UO ₂ 粉においては、本試験の造粒条件(バインダ添加率(0.5, 1.0%)、仮成形圧(1, 2, 3tonf/cm ²)、分級サイズ(212~425, 425~600, 600~850, 212~600, 425~850, 212~850 μm)の範囲では、(Carrの流動性評価手法*による)造粒粉の流動性に、差は見られなかった。	2-1 MOX粉末を用いて、造粒条件をパラメータとした造粒試験を行い、造粒粉の流動性及び充填性に与える影響を調べ、最適造粒条件を把握する。

表7 これまでの中空ペレット製造技術開発で得られた知見と今後の課題 (2/2)

開発課題	得た知見	結果	得られた知見	今後の課題
		<p>(b) 粉末の流動性*は、(低)⇐原料粉「不良」⇐ボールミル粉砕粉「かなり良好」⇐造粒粉「良好」⇒(高)となった。</p> <p>*; 流動性評価はCarrの流動性指数による。本来は安息角、圧縮度、スパチュラ角、均一度の4データから総合的に求める方法であるが、スパチュラ角については1回の測定に使用する量が多く今回の試験に適用できないため、安息角、圧縮度及び均一度のデータを用いてCarrの流動性指数で評価した。</p> <p>(c) 造粒粉末の充填性をグリーンペレット重量のバラツキで評価(分散分析)したところ、有為な差は認められなかった。よって、今回の試験条件(a)参照)の範囲では、造粒粉の金型(ダイス径φ6.12mm、中空コアロッド径φ2.29mm)への充填性に差は見られなかった。(但し、手充填による)</p>	<p>② UO₂粉においては、本試験の造粒条件{バインダ添加率(0.5, 1.0%)、仮成形圧(1, 2, 3tonf/cm²)、分級サイズ(212~425, 425~600, 600~850, 212~600, 425~850, 212~850 μm)の範囲では、造粒粉の金型(ダイス径φ6.12mm、中空コアロッド径φ2.29mm)への充填性に差は見られなかった。(但し、手充填による)</p>	<p>2-2 MOX粉末を用いて、成形条件をパラメータとした成形試験を行い、グリーンペレットの密度とそのバラツキ及び外観等に与える影響を調べ、最適成形条件を把握する。</p> <p>2-3 MOX粉末を用いて、焼結条件をパラメータとした焼結試験を行い、焼結ペレットの密度とそのバラツキ及び外観等に与える影響を調べ、最適焼結条件を把握する。</p> <p>〔なお 2-1~2-3 の試験は、MOX粉末の発生母塩をパラメータとした試験も視野に入れる。〕</p>
	<p>② ①で得た造粒粉を用いて、実際にもんじゅサイズ中空ペレットを支障なく充填、成形、焼結できることを中空ペレットの製造条件を把握する。(但し、従来法による条件把握の範囲内)</p>	<p>② ①で得たUO₂造粒粉で支障なくペレットが製造できたか? ダイス径φ6.12mm、中空コアロッド径φ2.29mmの組み合わせ(現行「もんじゅ」中実ペレット外径相当であり「もんじゅ」中空ペレットより小径)における金型への充填性に問題はなかった。また成形、焼結においても正常なペレットを製造することができた。(但し、手充填による)</p>	<p>② 造粒特性評価試験で得られたUO₂造粒粉を用いて、「もんじゅ」中空ペレットよりも外径が小さい中空ペレットを製造することができた。(但し、手充填による)</p>	
	<p>(2) 成形条件の把握 自動充填により、密度バラツキが小さく製品スペックに合致したもんじゅサイズ中空ペレットの成形条件を把握する。</p>	-	-	
	<p>(3) 焼成条件の把握 密度バラツキが小さく製品スペックに合致したもんじゅサイズ中空ペレットの脱脂・焼結条件を把握する。</p>	-	-	
3. 物性評価に関する課題	<p>(2) 流動性評価手法確立 ① ダイへの粉末充填における粉末流動性の最適な評価手法は何か</p>	<p>① 粉末流動性の最適な評価手法について (イ) 以下の3つの手法を選定した。 (a) パウダーテストによるCarrの流動性指数 (b) パウダーベッドテストによる粉体力学物性測定法 (c) 金属粉の流動度試験法(いわゆる砂時計式)</p> <p>(ロ) リファレンスデータの取得のため、パウダーテストを用いてUO₂の流動性を測定した。(造粒特性評価試験の中で実施)</p>	-	3-1 各種の粉末流動性評価手法について、①粉末充填時の流動性に対する測定方法の適用性評価、②物理的意味合い、③グローブボックス作業適用性などについて総合的に判断して、MOX粉末特有の流動性評価手法を確立する。
	<p>② 選定した流動性評価手法による中空ペレット製造上必要な流動性のしきい値の評価</p>	② 未実施	-	