

本資料は 年 月 日付で登録区分、
変更する。
2001. 6. 6

[技術情報室]

FBR用中空ペレット製造技術開発(1)

基 础 技 術 開 発 基 本 計 画

1993年10月

動力炉・核燃料開発事業団
東 海 事 業 所

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

限 定 資 料

P N C N 8410 93-216

1 9 9 3 年 1 0 月

F B R用中空ペレット製造技術開発(1)
基礎技術開発基本計画



報 告 者 宮本 寛* 加藤 直人*
野上 嘉能* 飛田 典幸*
小幡 真一* 山本 純太*
実施責任者 上村勝一郎*

要 旨

F B R用中空ペレットは、F B Rの炉心性能の高度化をめざして開発されている。

中空ペレットの製造は、中実ペレットの製造に比べて、成形するときに、中空用コアロッドが必要になる。この中空用コアロッドがあるため、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。

本報では、F B R用中空ペレット製造技術開発の一環として、核開部プル開室が所掌する基礎技術開発の基本計画について報告する。

* 核燃料技術開発部 プルトニウム燃料開発室

目 次

1. 概 要.....	1
2. 動燃におけるMOX中空ペレット製造実績.....	2
3. 開発課題.....	4
3.1 成形装置に関する開発課題	
3.2 製造技術に関する開発課題	
3.3 物性評価に関する開発課題	
4. 開発計画.....	6
4.1 成形装置に関する開発計画	
4.2 製造技術に関する開発計画	
4.3 物性評価に関する開発計画	
別添 1	10
別添 2	14

1. 概 要

FBR用中空ペレットは、FBRの炉心性能の高度化をめざして開発されている。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、スミア密度を調整することで高燃焼度化にも対応でき、燃料サイクルコストの低減につながる。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用コアロッドが必要になる。この中空用コアロッドがあるため、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のR&Dを進める必要がある。

核開部プル開室では、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。

2. 動燃におけるMOX中空ペレット製造実績

動燃におけるMOX中空ペレット燃料の試作製造は、昭和40年代前半より行ってきた。昭和40年代においては、現製造法と異なり、粉末を成型した後予備焼結を行ったペレットに、精密旋盤を用いて両端側からドリルで穴空けを行う方法（ドリル法）をとっていた。この方法では、時間と手間がかかり、量産規模の製造法としては、現実的ではなかった。

昭和50年代に入り、工程の簡略化及び製造の容易性の観点から、成型工程で中空の圧粉体を作る方法（成型法 図2.1参照）の開発を行ってきた。成型法により中空ペレットを製造するに際しては、金型（特に中空コアロッド）の形状、材質を検討して座屈強度等の改良を実施してきた。この方法での製造は現在も続いている、各種の照射燃料の製造に用いられている。

今までのMOX中空ペレット製造は、照射燃料が主で、特にFBR仕様の燃料では、計装線を入れるために中空ペレット（中空径約1.9mm）を製造したものである。以下に過去に製造したMOXペレットの概略仕様と製造量について示す。（表2.1）

表2.1 MOXペレットの概略仕様

キャンペーン	直径 (mm)	中空径 (mm)	高さ (mm)	密度 (%TD)	製造個数
FBR 常陽照射 INTA-1 INTA-2	5.40	1.9	8.0	8.5	250 } 590
	6.48	1.9	9.0	9.5	
	6.48	1.9	9.0	9.2	
ATR HALDEN照射 IFA-514 -529 -554/555	10.54	1.85	10.0	9.5	60 300
	10.54	3.5	10.0	9.5	
	10.66	1.85	10.0	9.5	50
	12.4	2.0	13.0	9.5	60
	12.4	3.5	13.0	9.5	200
	Puサーマル照射 PWR	8.19	1.8	13.5	100
BWR	10.31	3.6	10.3	9.5	20,000

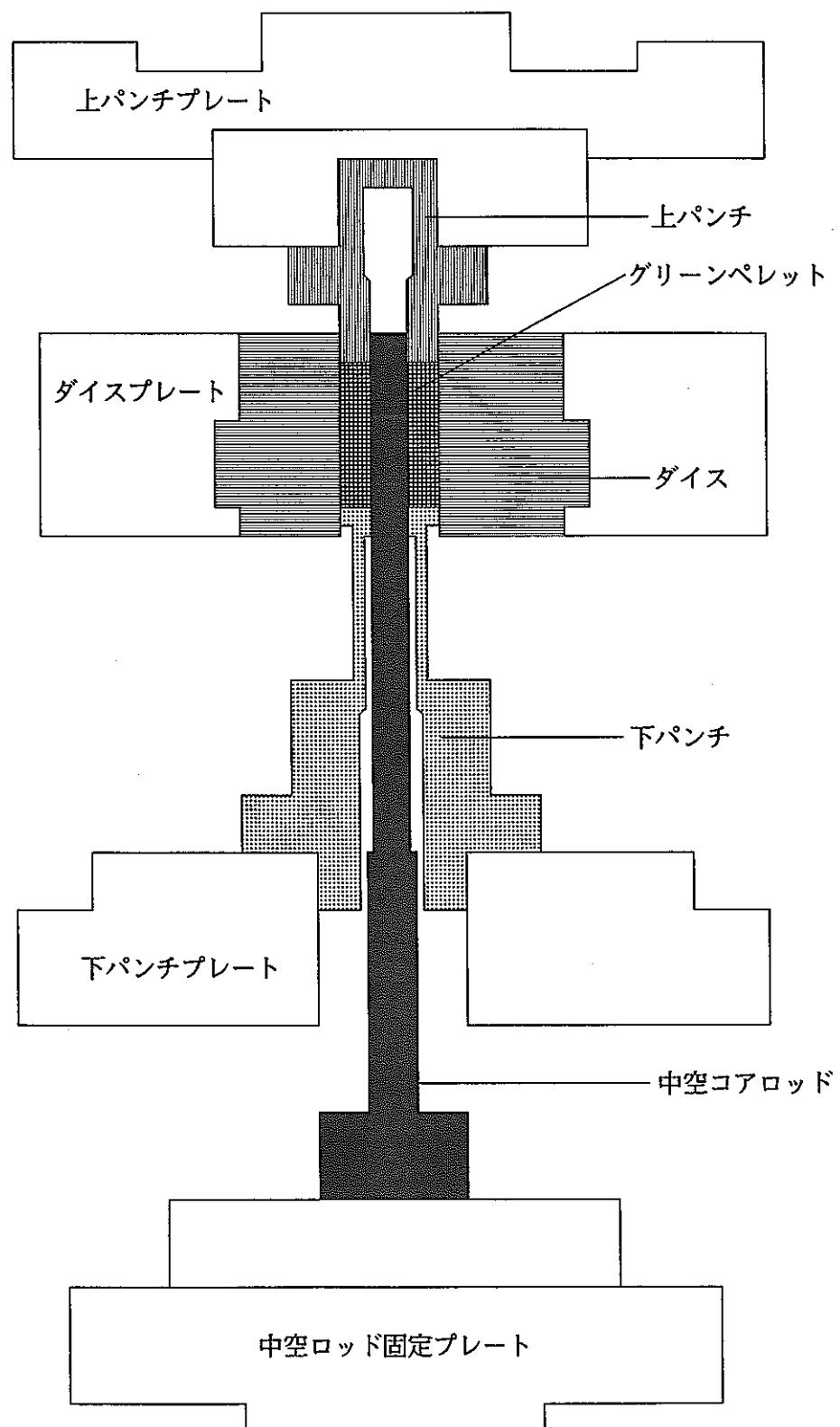


図 2.1 プレス金型配置図

3. 開発課題

FBR用高性能燃料の開発方針に基づき、FBR用中空ペレットの製造技術開発計画が検討され了承された。（H 4.12.22燃料開発会議、H 5.1.21研究開発幹部会）（別添1参照）

その資料の中で、平成8年度よりプルトニウム燃料工場における中規模量産試験を開始するに当たり、平成7年度の総合評価（I）に以下の内容を反映させることが求められている。

- 『(1) プル工場としては、ペレット製造の量産性を考慮し、スラグ造粒、ロータリープレス方式での中空ペレット製造の量産化を目指している。従って、レシプロ方式とロータリープレス方式の粉末供給システム等の差異を把握した上で、いずれの方式が適しているのかが提示できるよう両方式によるペレット試作試験を行うこと。』
- (2) 模擬粉末及びウラン粉末を用いて行う中規模量産試験の結果から、実粉末を用いた場合の外挿評価が可能なように、基礎特性評価試験にて模擬粉末、ウラン粉末及びMOX粉末を用いた比較評価試験を実施すること。
- (3) 混合転換MOX粉末、海外受入粉末等の粉末特性の異なったものの造粒性、流動性の特徴を把握する基礎特性試験を行うこと。』

これまでのプル開室でのFBR用中空ペレットの製造は、照射試験を目的とした小規模なもの（数十～数百個程度／ロット）であり、製造歩留りや量産（数万個／日）を考慮した製造は、実施していなかった。そこで、以上のこと考慮して、プル開室では、中空ペレット量産技術開発における課題を以下のように設定した。

3.1 成形装置に関する開発課題

過去、プル開室がFBR用中空ペレットの製造に用いた中空コアロッドの径は～2mmと細いため、成型時の高応力により中空コアロッドの破損が多く生じた。そのためグローブボックス内での金型交換頻度をできる限り少なくし、コアロッドの変形等による不良品の発生を防止し、ペレットの量産化を図るために、耐久性があり強度の高い中空コアロッドの開発が今後の課題となる。

この破損防止対策として、中空コアロッドの材質の選定、形状の最適化が考えられる。特に中空コアロッドの強度の観点から、現状の乾式成型機での最小中空径の把握も重要な課題である。

量産化段階においては、長期使用にともなう中空コアロッドの変形等が懸念される。中空コアロッドの変形は芯ずれ等の原因となるため、変形等に対する耐久性も調べる必要がある。

3.2 製造技術に関する開発課題

中空ペレットと中実ペレットの製造上の大きな相違は、成形金型の中空コアロッドの有無のみであるが、この中空用コアロッドが存在することにより、以下のような問題が生ずると考えられる。

(1) 造粒粉末のダイスへの充填性が悪くなる。

(2) 中実ペレットの成形に比べて、圧力分布が不均一になる可能性がある。

特にコーナー部において圧力分布の不均一部が生じ、マイクロクラックやキャッピングの発生が予想される。

(3) ペレットの中心部分に中空孔があることから、落下等の衝撃に対してカケ・ワレ等が発生しやすくなる。

このため、F B R用中空ペレットの製造技術に関する課題として、ダイスへの充填が均一になるような、流動性の良い造粒粉末の製造条件を主眼において粉末処理条件を確立する必要がある。

また、マイクロクラックやキャッピングが発生せず、ハンドリングにおけるカケ・ワレの発生を中実ペレットと同程度に抑える成形条件を確立する必要がある。

中実ペレットと中空ペレットを比較して、脱脂性、焼結性に差異が生じるかどうか脱脂、焼成条件のサーベイを行う必要がある。

3.3 物性評価に関する開発課題

従来プル工場、核開部プル開室とも、粉末の流動性評価手法としてCarrの流動性評価手法を使用してきた。Carrの流動性指数は、安息角、圧縮度、スペチュラ角、凝集度を測定し、これらの測定値を指數に換算し、それぞれの指數の値を合計して、Carrの流動性指数としている。この指數はあくまでも経験的にまとめた指數で物理的な意味はない。そこで、プル開室としては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かつ定量的に評価する手法の確立をめざす。

4. 開発計画

前項の開発課題を踏まえ核開部プル開室では、FBR用中空ペレット製造技術開発の基礎技術開発基本計画を次のように定める。尚、開発基本計画に係る詳細な試験計画は別途定める。

4.1 成形装置に関する開発計画

プル工場としては、ペレット製造の量産性を考慮し、スラグ造粒、ロータリープレス方式での中空ペレット製造の量産化を目指している。従って、核開部プル開室では、現状のレシプロ方式とロータリープレス方式の粉末供給システム等の差異を把握した上で、いずれの方式が適しているのか提示する必要がある。

核開部プル開室では、ロータリープレス機本体の装置開発は行わないが、プル工場が設計製作するロータリープレス機を使用してレシプロ方式との比較のためペレット試作試験を行う必要がある。

以下成形装置の開発に関して、核開部プル開室が実施する中空コアロッドの開発計画について述べる。

4.1.1 中空コアロッドの設計

中空ペレット成形時に中空コアロッドに作用する応力について検討する。中空コアロッドには、耐摩耗性が大きくかつ座屈強度、衝撃強度が大きいという相反する性質が要求される。ここでは、成形時に中空コアロッドに作用する応力を詳細に検討しつつ最適形状についても検討する。

4.1.2 中空コアロッド用材料の選定

中空コアロッドの設計結果を基に材料の選定を行う。さらに、その中から有望な材料について試作を行う。

4.1.3 試作した中空コアロッドの性能評価計画

試作した中空コアロッドの実用化のポイントは、中空コアロッドの強度と耐久性を実証することである。

中空コアロッドの強度と耐久性に関する評価のポイントを以下に示す。

- 座屈強度評価
- 耐摩耗性評価
- 疲労強度評価

4.2 製造技術に関する開発計画

4.2.1 粉末処理条件の開発

UO_2 粉末、 MOX 粉末を用いて、造粒の条件を水準とした造粒試験を実施し、成形時の充填性、ペレット外観、密度バラツキ等に与える影響を調べ、最適造粒条件のサーベイを行う。

- 造粒条件
- ① 造粒圧力 (ton/cm^2)
 - ② 粒度分布 (μm)
 - ③ バインダー添加率 (wt%)

4.2.2 成形条件の開発

造粒の条件に加えて成形条件を水準にした試験を実施し、グリーンペレットの密度、バラツキ、外観等に与える影響を調べる。

- 成形条件
- ① 成形圧力 (ton/cm^2)
 - ② 充填量 (mm)
 - ③ ルプリカント添加率 (wt%)

以上 2 つの試験は、プル第一開発室 R-125 室 G-108 のウィズドローアル方式のプレス機を使用して実施する。

4.3 物性評価に関する開発計画

4.3.1 MOX 粉末流動性評価手法の確立

粉末の流動性評価手法として従来から使用してきた Carr の流動性評価手法、金属粉の流動性試験方法 (JIS Z 2502)、粉体力学物性測定法の 3 つの手法を総合的に判断して、 MOX 粉末特有の流動性評価手法の確立を目指す。

(1) 金属粉の流動性試験方法 (JIS Z 2502) の適用可能性について
粉末冶金業界では、金属粉末にのみ適用可能な試験方法を規定している。

本試験方法がセラミックス粉末である UO_2 粉末、 MOX 粉末に適用可能かどうか試験装置を作製して試験を実施する。

以下に簡単に JIS Z 2502 の試験方法を示す。

- ① 漏斗、漏斗支持台、スタンドを準備する。
- ② 漏斗底のオリフィス部分を塞いで、漏斗部分に一定量の粉末を装荷する。
- ③ 測定は、ストップウォッチを用い、オリフィスの底を開くと同時に測定を始め、漏斗の上部よりみて最後の粉末が通過した瞬間までの時間を秒で記す。

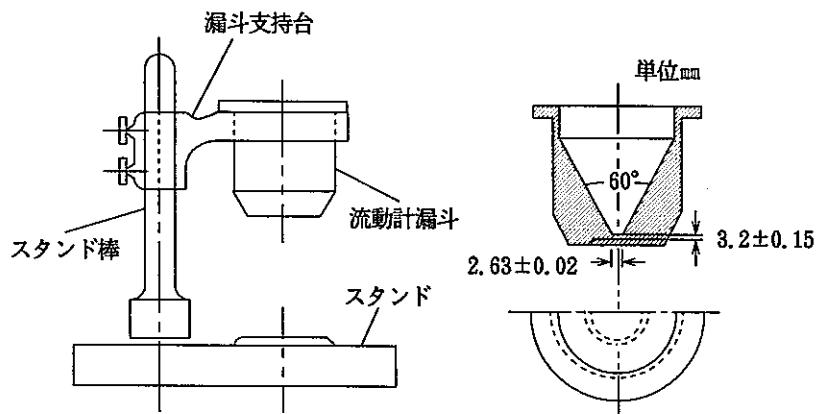


図4.1 金属粉末の流動度測定方法 (J I S Z 2 5 0 2)

(2) 粉体力学物性測定法の適用可能性について

一般的に粉体の力学的な性質は、粒子間に働く相互作用によって決められる。この相互作用力には、分子間引力、静電気力、液膜架橋による力などが考えられるが、これらの力は、粒子を構成する固体の性質、粒子表面の性質に起因し、粒子の大きさや形状にも影響される。

粉体の力学的性質を測定することで、粉粒体の挙動を解明し予想することができる。ここでは、粉体の力学的性質の破壊包絡線を求ることで評価する。この破壊包絡線を基礎にして表された流動性は、粉体の定常的な動的挙動を示すというよりは、応力限界状態での平衡がくずれる状態を表現するものであり、プレス機のホッパー等における閉塞現象との関連が大きい。

ここでは、粉体の力学的性質の破壊包絡線を求ることで、粉体の流動性評価として適用可能かどうか判断するために以下のステップで判断する。

① 最適手法の確立

粉体の力学的性質の破壊包絡線を求めるには、Jenikeの表現、Stainforthの表現、F Iの表現などがある。これらの手法のうち粉体の流動性評価に最適な手法を検討する。

② 試験機の製作

最適手法を文献調査等で実施した後、その試験機の製作を行う。

③ コールド試験の実施

核燃料物質で試験をする前にコールドで試験機の取扱い性等をテストする。

④ ホット試験の実施

コールド試験の実施結果を受けて、核燃料物質（UO₂，MOX）で試験をおこなう。

以上より核開部プル開室で実施する中空ペレット製造技術開発項目は、成形装置に関する開発計画、製造技術に関する開発計画、物性評価に関する開発計画の3つに分けられる。それぞれの開発項目に関して、具体的な開発項目ごとにWBS展開を実施した。別添2に中空ペレット製造技術開発のWBS展開図を示す。

F B R用中空ペレット製造技術開発計画 (改1)

平成 4 年 12月 22日
核燃料技術開発部
プルトニウム燃料工場

1. 中空ペレット開発について

F B R用高性能燃料の開発方針に基づき、F B R用中空ペレットの製造技術開発計画を策定する。

2. 開発計画の基本ステップ

- ・フェーズI (平成3年～7年) プル開室を中心とした基礎試験。
 - ・総合評価(1) 中規模量産試験用装置仕様の確定、フェーズII以降の試験計画の見直し。
- ・フェーズII (平成7年～8年) プル工場のモックアップによる中規模量産試験中空ペレット採用に伴う実ライン設備更新の検討。
 - ・総合評価(2) 実ライン導入装置の仕様確定。中空ペレット採用の確定。採用時期の目標年度確定。
- ・フェーズIII (平成9年～11年) 実ラインによる最終確認試験及び変更設備の導入開始。
- ・フェーズIV (平成11年～) 実ラインで製造するための周辺設備の導入、既存旧設備の撤去作業等の実施。

3. 中空ペレット製造技術の開発について

- ① 中空ペレットの採用にあたってはペレット外径を現行もんじゅペレット外径より太径とすることが望ましい。その開発目標外径、内径及び公差幅を動研本部から平成5年度始めに提示されることが必要である。
- ② 製造技術に関する基礎試験及び粉末特性の制御等の基礎試験は、従来通りプル開室で実施する。
- ③ 平成6年度よりプルトニウム燃料工場として中規模量産試験を開始するが、平成7年度の総合評価(1)には以下の内容を反映させる。

- (1) プル工場としては、ペレット製造の量産性を考慮し、スラグ造粒、ロータリープレス方式での中空ペレット製造の量産化を目指している。従って、レシプロ方式とロータリープレス方式の粉末供給システム等の差異を把握した上で、いずれの方式が適しているのかが提示できるよう両方式によるペレット試作試験を行う。
- (2) 模擬粉末及びウラン粉末を用いて行う中規模量産試験の結果から、実粉末を用いた場合の外挿評価が可能なように、基礎特性評価試験にて模擬粉末、ウラン粉末及びMOX粉末を用いた比較評価試験を実施する。
- (3) 混合転換MOX粉末、海外受入粉末等の粉末特性の異なったものの造粒性、流動性の特徴を把握する基礎特性試験を行う。
- (4) 平成6年のモックアップ室でのロータリープレスによるペレット試作試験を受けてプル工場で中規模量産試験を開始するが、プル開室は、その後もプル工場の量産化技術開発試験のバックアップのための基礎試験を継続し平成10年度の総合評価(2)に備える。

4. 中空ペレットの検査装置の開発について

プル工場で開発を行う予定であるが、その開始は平成5年度からとなる。その検査レベルについては、設計仕様に依存するため、平成5年度始めに提示される開発目標仕様に基づき、詳細計画を策定する。従って、現時点では検査レベルを決定することが困難であるが当面、以下の点に留意した開発計画を策定した。

- ① 設計側に対し、燃料製造段階で中空径の測定が必要ないように、線密度規格(g/cm³)でペレットの品質検査が可能ないように要望する。
- ② 密度規格が必要である場合、従来の幾何寸法重量測定法で密度を算出するには、内径の測定が必要となる。先行試験等で、内径、外径、高さ、重量のバラツキを評価することも品質管理及び品質保証上重要であるから、外径、高さ、重量の測定速度と同期可能な速度で中空径を測定できる検査装置の開発を目標とする計画である。
- ③ 検査装置のレベルについては、平成5年度の開発目標仕様を検討し、品質保証等を考慮した上で最終決定を行い、平成6年度からプル工場としてのR&Dを開始する。

5. 中空ペレット製造技術開発スケジュール(案)

1) プル開発室担当分

- ① 中空コアロッドの破損防止及び耐久性評価試験の実施。
- ② 充填粉末流動性に関する基礎研究と造粒粉性状の最適化指針の作成。

- ③ ATR実証炉用ロータリープレスを用いてロータリープレスでの基礎特性試験。
試験実施に当たっては、プル工場担当者も参加する。
 - 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の提示。開発計画のC&Rの実施。
- 2) プル工場担当分
- ① 中空ペレット検査装置の開発。
 - ② ATR実証炉用ロータリープレスを改造してロータリープレス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。（ロータリープレス装置の導入が必要であり、その改造はプル工場が行なう。）
 - 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、生産計画基礎定数の確認、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）。

なお本計画遂行に必要な人員増加及び試験研究予算が確保されることを前提としている。

平成4年12月22日

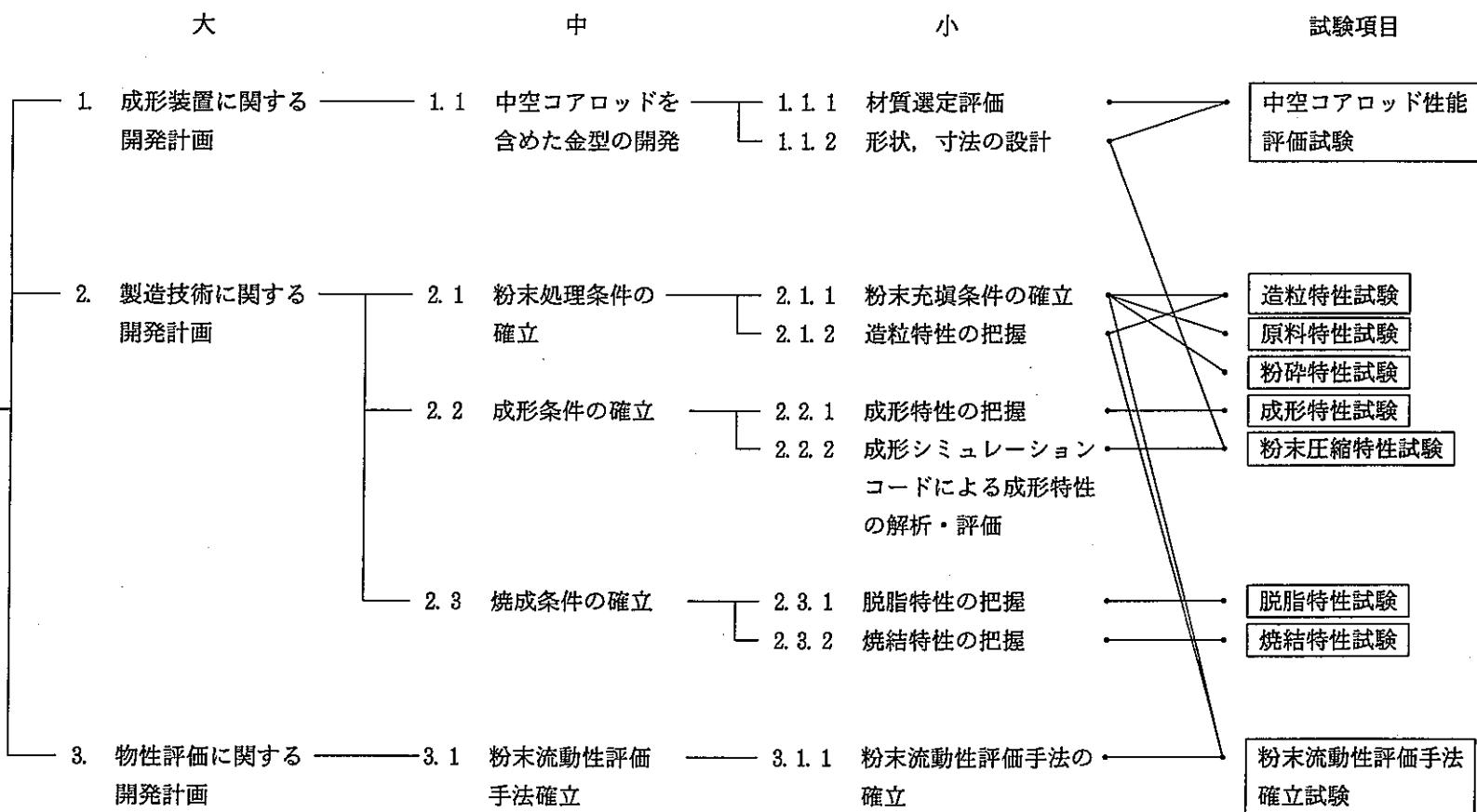
中空ペレット製造技術開発スケジュール

試験項目	担当箇所	H3年度(1991)	H4年度(1992)	H5年度(1993)	H6年度(1994)	H7年度(1995)	H8年度(1996)	H9年度(1997)	H10年度(1998)	H11年度(1999)	H12年度(2000)
マスター スケジュール				フェーズI ▽		総合評価(1) →▲	フェーズII 総合評価(2) →▲	フェーズIII		総合評価(3) →▲	
基礎特性評価試験I ① ダム&F の開発 ② ペレット試作試験	Pu開室 Pu開室	調査、設計、試作(1) (R-125)		(燃料仕様の目標値設定) 造粒試験(1) 成型試験(1) 評価(1) ラン ラン							
基礎特性評価試験II ③ ペレット試作試験	Pu開室 Pu開室 Pu工場			(R-125) 設計 (ラン&F室) 設計、製作 ATIR 試験 建設室	造粒成型試験(2) 試作(2) 試験(3) 試験(4) 評価(2) 試験(6) ラン NOX 装置導入 試作試験(5) 試験(7) ラン NOX ラン(3)		試験(8)				
基礎基盤技術開発 ④ 成型クレーリング解析	Pu開室			調査、計画 ソフト開発(1)	実験解析(1) ソフト開発(2)						
中規模量産試験 ⑤ 造粒設備試作試験 ⑥ 成型設備試作試験	Pu工場 Pu工場			(ラン&F室) 調査選定 (ラン&F室) 調査選定	設計、製作 設計、製作	ラン試験(1) 評価 ラン試験(1) 評価 ラン試験(2) 評価	ラン試験(2) 評価 ラン試験(2) 評価 ラン試験(2) 評価				
造粒成型確認試験 ⑦ 先行確認試験	Pu工場					(Pu3-L&H+ライン)	調査 設計、製作	確認試験			
検査装置の開発 ⑧ 中空径測定法検討 ⑨ 検査装置の試作	Pu工場 Pu工場			調査 仕様検討、検査システム	設計、製作 ランゲル 测定試験 改良		測定試験(2)				
検査装置確認試験 ⑩ 先行確認試験	Pu工場					(Pu3-L&H+ライン)	調査 設計、製作	確認試験			

図

中空ペレット製造技術開発WBS 展開
(プル開室担当分)

-14-

基礎技術開発
基本計画

別添2