

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。

2001 6 - 6

[技術情報誌]

PNC-6.7 照射試験用混合酸化物 ペレットの製造記録

Fabrication Record of PNC-6.7 Mixed Oxide Fuel
Pellets For Irradiation Test At Rapsodie.

1 9 7 8 年 2 月

動力炉・核燃料開発事業団
東 海 事 業 所

この資料は，社内における検討 田

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



P N C - 6,7 照射試験用混合酸化物ペレットの製造記録

Fabrication Record of PNC-6.7 Mixed Oxide Fuel
Pellets For Irradiation Test At Rapsodie.

実施責任者	小 泉 益 通	ブル燃開発課課長
	鹿 島 貞 光	# 試料係
	加 納 清 道 [※]	鈴 木 征 雄
	五十嵐 敏 廣 ^{※※}	佐々木 進
	今 井 忠 光	山 本 純 太
	高 信 修	落 合 洋 治
	成 田 大 祐	柴 田 忠 志 ^{※※}
	鈴 木 隆 平	

期 間 1 9 7 5 年 1 2 月 ~ 1 9 7 7 年 2 月

目 的 P N C - 6.7 照射試験用混合酸化物ペレットの製造

要 旨 高速増殖炉原型炉「もんじゅ」を対象に冷却材事故時、及び過出力事故時における
燃料ピンの安全性確認のための実験が計画された。

ここでは、この実験に供される燃料ペレットの製造について記述する。(Pu0.3, U0.7)O₂, 60%濃縮ウラン密度85%T・Dのペレットを燃料ピンにして24本分製造した。60%濃縮ウランは手持ちが無かったので90%Euと天然ウランを混合して調整した。密度の調整はポリエチレン粉末を添加して行なった。予備試験の結果1.5 W₀ポリエチレン添加で所定の密度に調整し得たが、径が幾分か大きめであったのでセンターレス研磨を行なった。ところが、研磨面にポリエチレンが原因したクラックが無数認められ好ましくない結果となったので、焼結あがり仕様を満たす方法を取った。結果として取扱いロット数が増えたが、本プロジェクトを通し密度降下剤としてのポリエチレン使用について有益な知見を得たことは今後の業務に役立つと思われる。

※ 三菱原子燃料(出向) ※※ 日立製作所(派遣)

目 次

1. 概 要	1
2. 燃料ペレット仕様	2
2-1 Fuel Pellet	2
2-2 Insulator Pellet	3
3. 原 料 粉	4
3-1 二酸化ウラン粉末	4
3-2 二酸化プルトニウム粉末	5
4. 60%濃縮ウランの調整	6
5. 製造試験および製品製造	7
5-1 Phase - I	7
5-2 Phase - II	12
5-3 Phase - III	14
6. 履歴及び分析物性測定結果	16
6-1 履 歴	16
6-2 分析・測定結果	18
6-3 オートラジオグラフ検査結果	19
6-4 金相試験結果	21
6-5 X線検査結果	26
7. ま と め	28
7-1 乾式回収について	28
7-2 ペレット形状について	29
7-3 G-11炉使用上の留意点	30
7-4 密度調整	30
7-5 低密度, 低O/M, 高ガスについて	33
8. 核物質収支	36
9. あとがき	37
10. 付 録	38
10-1 被曝量の推定および結果	38
10-2 理論密度	40

1 概 要

PNC-6.7 照射試験用ペレットを昭和50年12月から昭和52年2月にかけてビンにして24本分製造した。ペレットは、組成30%PuO₂-70%UO₂(60%濃縮)、密度85%T・D、径5.44mmの仕様であった。濃縮ウランは60%のものが無かったので、90%Euと天然ウランをポリエチレン製3リットルビンに入れ回転混合法で調整した。密度の調整は100ミクロン径ポリエチレンを添加することにより可能であるが、径の許容幅が±0.03mmと狭いので、As sinteredでの管理は難かしいと予想された。予備試験の結果ポリエチレン1.5w/o添加、1700℃2時間焼結で径がわずかに大きめであるが、その他の仕様は満たすことがわかり研磨を予想し本番を進めた。ところが、製造したペレットの研磨面を観察すると、ポリエチレンのスプリングバックが原因と思われるクラックがハッキリ認められ機械的強度、外観上に問題が生じる恐れがあることから、ペレットは無研磨とし更にポリエチレンによるクラック発生も出来るかぎり少なくする方向で再製造することになった。そこで今までのペレットは乾式回収をし再使用に備えた。乾式回収は800℃空気-NHサイクルの条件で試みたが、ペレットのままでは回収が難かしかつたので、あらかじめエリスモーターで粒状(<1mmφ)にしてから行なった。又、ブルとウランの混合の均一性の点からボールミル法を採用したが予備試験の終わった段階でポットライニング(シリコンゴム製)がはがれ使用不可となつたので、以後はS型混合器+WCボールの組合せで粉碎混合を行なった。最終的にはポリエチレン添加0.8w/o、0.68w/o、ダイス径5.75mm、成型圧2~3 ton/cm²、1700℃×2時間焼結で満足すべきペレットが得られた。本プロジェクトを通じ、密度降下剤としてのポリエチレン使用について有益な知見を得たことは今後のペレット製造に役立つものと思われる。

2 燃料ペレット仕様

2-1 Fuel Pellet

Material	PuO ₂ - UO ₂	
Shape	Solid Pellet	
Dimension		
Diameter	5.44 ± 0.03mm	
Height	10 ± 1	mm
Column length	120 ± 2	mm
PuO ₂ Content	30 ± 1	%
U-235 enrichment	60	%
Density	85 ± 2	%T.D
O/M	1.96 ~ 2.00	

Released gas amount (including H₂O) 150 μl/g

Isotopic composition of plutonium

Pu - 238	0.1	%
Pu - 239	76.0	%
Pu - 340	19.8	%
Pu - 241	3.5	%
Pu - 242	0.6	%

Impurities

Al <200ppm	F < 25ppm
B < 10ppm	Fe <500ppm
C <150ppm	Mg < 25ppm
Cd < 10ppm	N <100ppm
Cl < 25ppm	Ni <200ppm
Cr <200ppm	V <100ppm

Total of Cu, Zn, Si <600ppm

Total of Ag, Mo, Pb, Sn <200ppm

2-2 Insulator Pellet

Material	UO ₂
Shape	Solid Pellet
Dimension	
Diameter	5.30 ± 0.05mm
Height	10 ± 0.2 mm
Lower blanket column length	10 ± 0.2 mm
Upper blanket column length	10 ± 0.2 mm
Enrichment	Natural
Density	93 ± 2% T.D
O/M	2.00 ~ 2.03
Released gas amount (including H ₂ O)	
Impurities	150 μl/g
Al	<200ppm
B	< 10ppm
C	<150ppm
Ca	< 25ppm
Cd	< 20ppm
Cl	< 25ppm
Cr	<200ppm
F	< 25ppm
Fe	<500ppm
H	< 5ppm
Mg	< 25ppm
N	<150ppm
Na	<200ppm
Ni	<200ppm
V	<200ppm
Total of Cu, Zn, Si, Ti,	<600ppm
Total of Ag, Mn, Mo, Pb, Sn	<200ppm

3 原 料 粉

3-1 二酸化ウラン粉末

60%濃縮ウランは、以下の特性を持つ90%濃縮ウランと、天然ウランをポリエチレン製容器で回転混合し調整した。国籍はU.S.Aである。

	90%EUO ₂	NUO ₂
メーカー		住友金属鉱山KK
濃縮度	90.05% (AEC送状)	
U含有率	87.64%	87.56% (酸化重量法)
O/U比	2.05	2.09 (ポーラログラフ法)
水分	0.14w/o	0.20 (CECCoalometry)
平均粒径	0.6 μ	2.25 μ (Fisher Subsieve Sizer 法)
かさ密度	1.9 g/cm ³	2.7 g/cm ³ (Fill Volume 法)
比表面積	4.5 m ² /g	5.44 m ² /g (B・E・T 法)
タップ密度	2.9 g/cm ³	4.0 g/cm ³ (応用理化充填密度測定装置)
Ag	< 0.5	< 0.1 (分光分析法)
Al	< 14	< 4 "
B	< 0.3	< 0.1 "
Cd	< 0.3	< 0.2 "
Cr	< 3	< 3 "
Cu	< 0.5	< 1 "
Fe	< 14	< 14 "
Mg	< 2	< 2 "
Mo	< 3	< 3 "
Ni	< 6	< 6 "
Si	< 6	36 "
Sn	< 1	< 1 "
C	97	31 (重量滴定法)
Ca	10	< 2 (原子吸光法)
Cl	< 5	< 2 (比濁法)
F	< 5	< 1 (吸光光度法)
N	89	15 (吸光分析法)
Dy		< 0.05 (分光分析法)
Eu		< 0.05 "
Gd		< 0.05 "
Sm		< 0.05 "
Pb	< 1	

3-2 二酸化プルトニウム粉末

B・N・F・Lより購入し、プルトニウム燃料部第2開発室常陽ラインで使用したものを湿式回収したもので、品質は以下の通りである。

メーカー	B・N・F・L	
同位体組成	Pu-238	0.1 %
	Pu-239	77.26
	Pu-240	19.25
	Pu-241	2.83
	Pu-242	0.56
比表面積	13.39 m ² /g	(B・E・T法)
Pu含有率	86.6 %	
Ag	< 1	
Al	< 50	
B	< 1	
Cd	< 5	
Cr	50	
Cu	< 5	
Fe	120	
Mg	< 10	
Mn	< 10	
Ni	30	
Si	60	
V	< 50	
Zn	< 100	
C	360	
Cl	< 25	
F	< 10	
N	< 50	

4 60%濃縮ウランの調整

90%濃縮ウランと天然ウランを、3ℓポリエチレン製ビンにアルミナボールとともに装荷し、G-007ボールミル架台を用いて4時間回転混合をした。容器の長さ/径比が約1.8もあることから軸方向の均一性を考慮し、30分毎にシェーキングをした。同位体分析結果は良好であった。

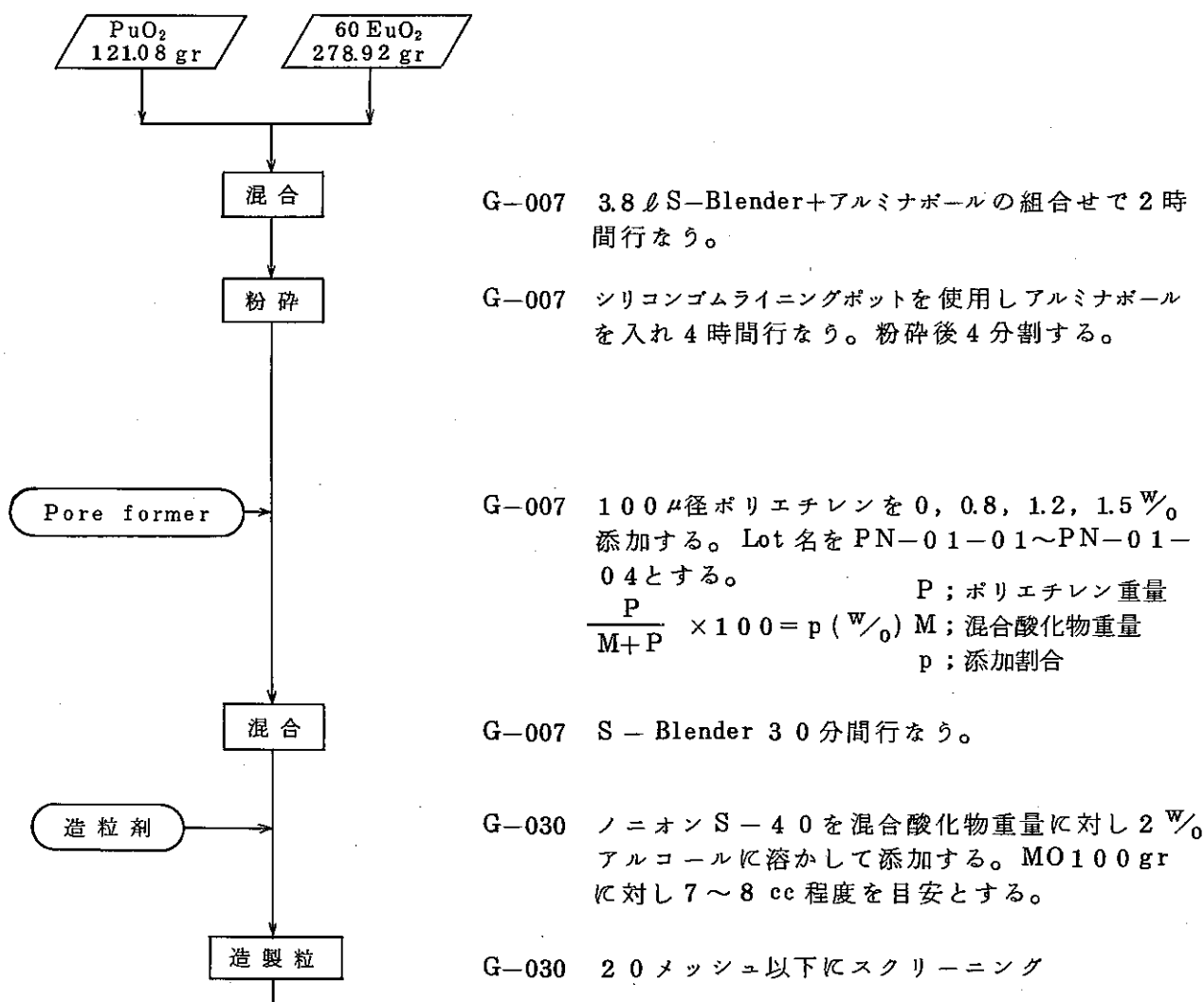
5 製造試験及び製品製造

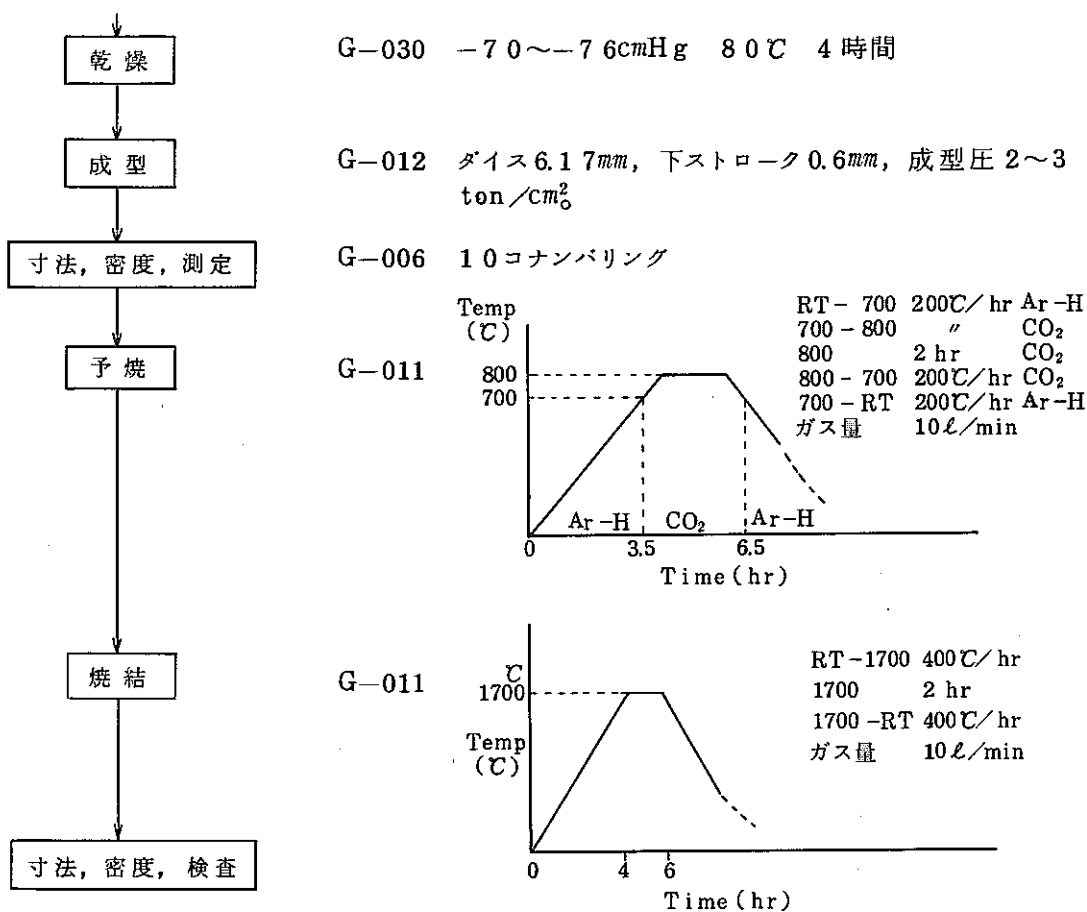
予備試験から製品製造までを3つに分けて記述する。Phase-I:粉末特性を把握し密度調整剤の適性添加量の検討。Phase-II:乾式回収粉を使用し、クラック発生を押さえる方法の検討。Phase-III:焼結あがりのままで仕様を満たす条件での本番製造。

5-1 Phase-I

目的 使用粉末特性に基づく焼結時のペレット収縮率と密度コントロール剤としての100μ径ポリエチレン添加について情報を得、その結果をもとに製品製造を行なう。

方法 添加ポリエチレン量をパラメータとし、以下のフローチャートに従って行ない、その結果の最適条件で製品製造ロットを流す。





G-006 ナンバリングペレットについて寸法密度測定

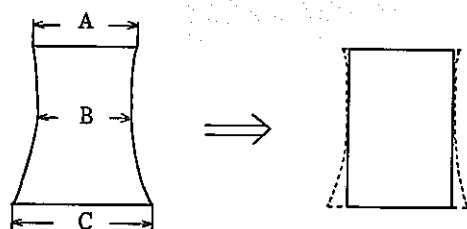
Fig - 5.1.1 Phase - I フローシート

結果 Lot PN-01-01~PN-01-04 の焼結前後の寸法密度結果を Table - 5.1.1 に示す。Fig-5.1.2 に示すように焼結密度 V S ポリエチレン量は、良い相関を持つことがわかる。これから 85% T・D を目標にするならば、1.5%^w 添加が適当といえる。PN-01-03 Lot からグリーンペレット 10 コ抜き出し焼結雰囲気 を 5% H₂ - 95% N₂ にして行なったが、寸法密度に関し 5% H₂ - 95% Ar との差は見つからなかった。ペレット径はいずれも小さ過ぎるので 5.44mm を狙うには 6.34mm のダイスが適当といえるが、ペレットは Fig.5.1.3 に示すように非対称の Hourglass 状であり、B・C 間の差は ~5/100mm 程度あるので破線部を削り落とし真円柱に近づける意味から大き目のダイス 6.40mm を使用するのが適当である。

Table-5.1.1 Phase - I 焼結試験結果

		Lot	PN-01-01	PN-01-02	PN-01-03	PN-01-04
Green Pellet	Dia (mm)		6.259	6.260	6.260	6.260
	Hei (mm)		11.574	11.79	11.81	12.71
	Wei (gr)		2.402	2.357	2.272	2.402
	Den (g/cm^3)		6.747 (61.1)	6.495 (58.8)	6.251 (56.6)	6.140 (55.6)
Sintered Pellet	Dia (mm)		5.255	5.253	5.273	5.295
	Hei (mm)		10.09	10.26	10.12	10.81
	Wei (gr)		2.328	2.248	2.137	2.238
	Den (g/cm^3)		10.64 (96.36)	10.11 (91.58)	9.670 (87.59)	9.402 (85.16)

()は% T.Dで表わした値である。

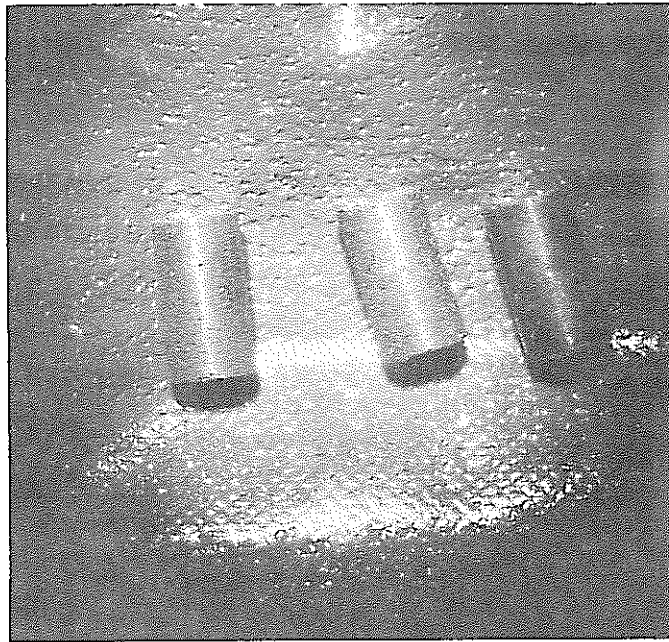


$$B < A < C$$

Fig.- 5.1.3

以上の考察のもとに製品燃料としてのPN-12-01, PN-13-01 Lotを進めた。密度は仕様中心より若干低目であるが、ほぼ予想通りであった。これらのロットはペレット直径が仕様値よりやや大きかったのでセンタレス研磨を行なった。研磨面を観察すると、Photo-5.1.1及びPhoto-5.1.2に示すように焼結のままでは全く異常がなかったにもかかわらず、横方向クラックが多数認められ機械的強度と外観上の理由からこのLotは不合格とした。

N841-78-16



X2

Photo - 5.1.1

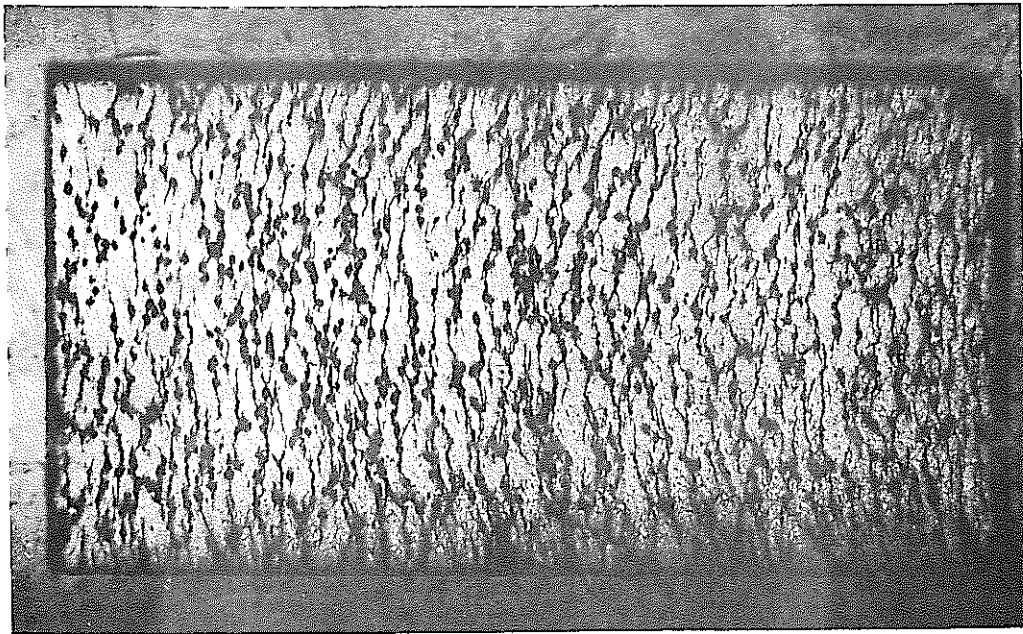


Photo - 5.1.2 軸方向断面写真

1 mm

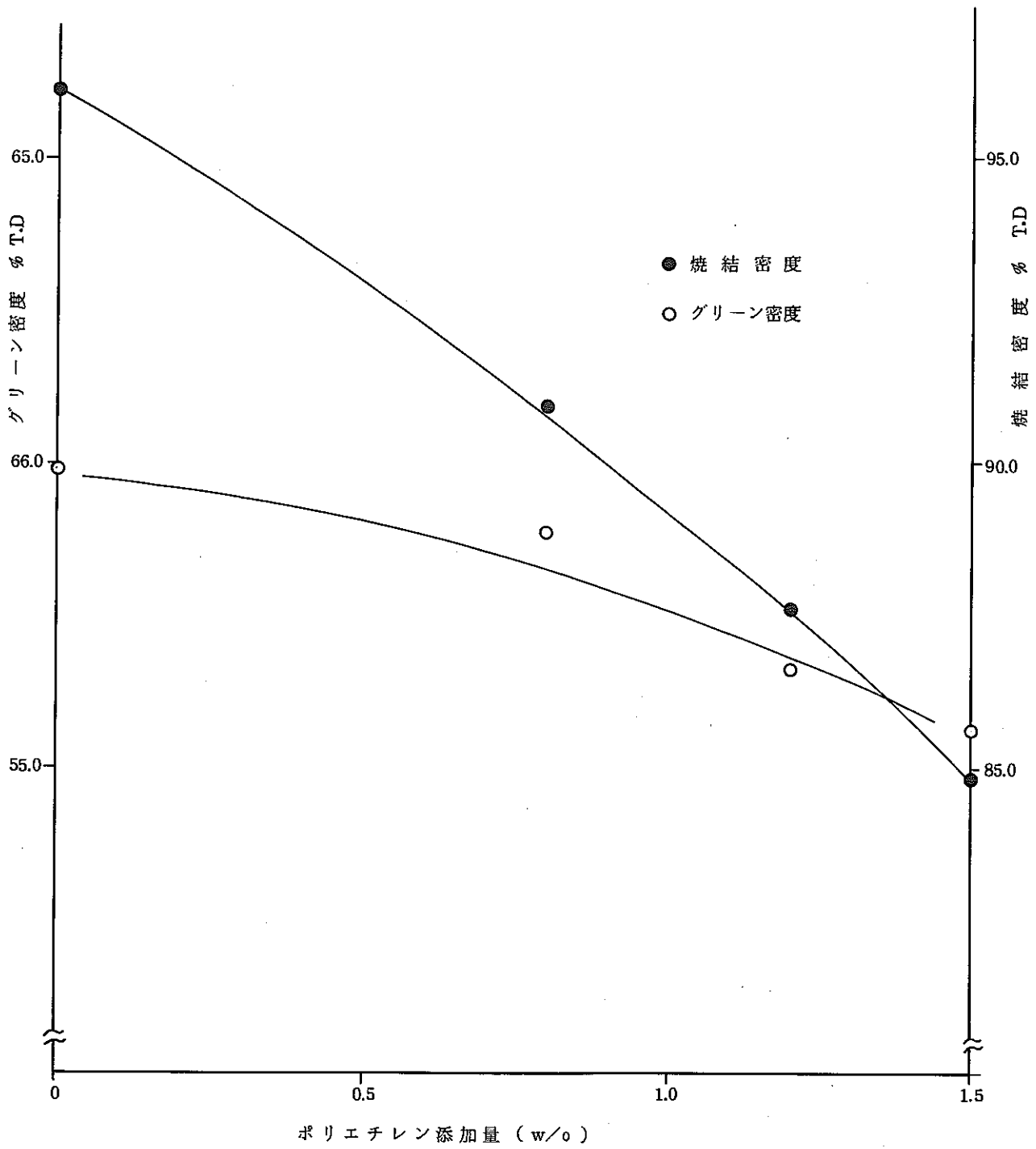


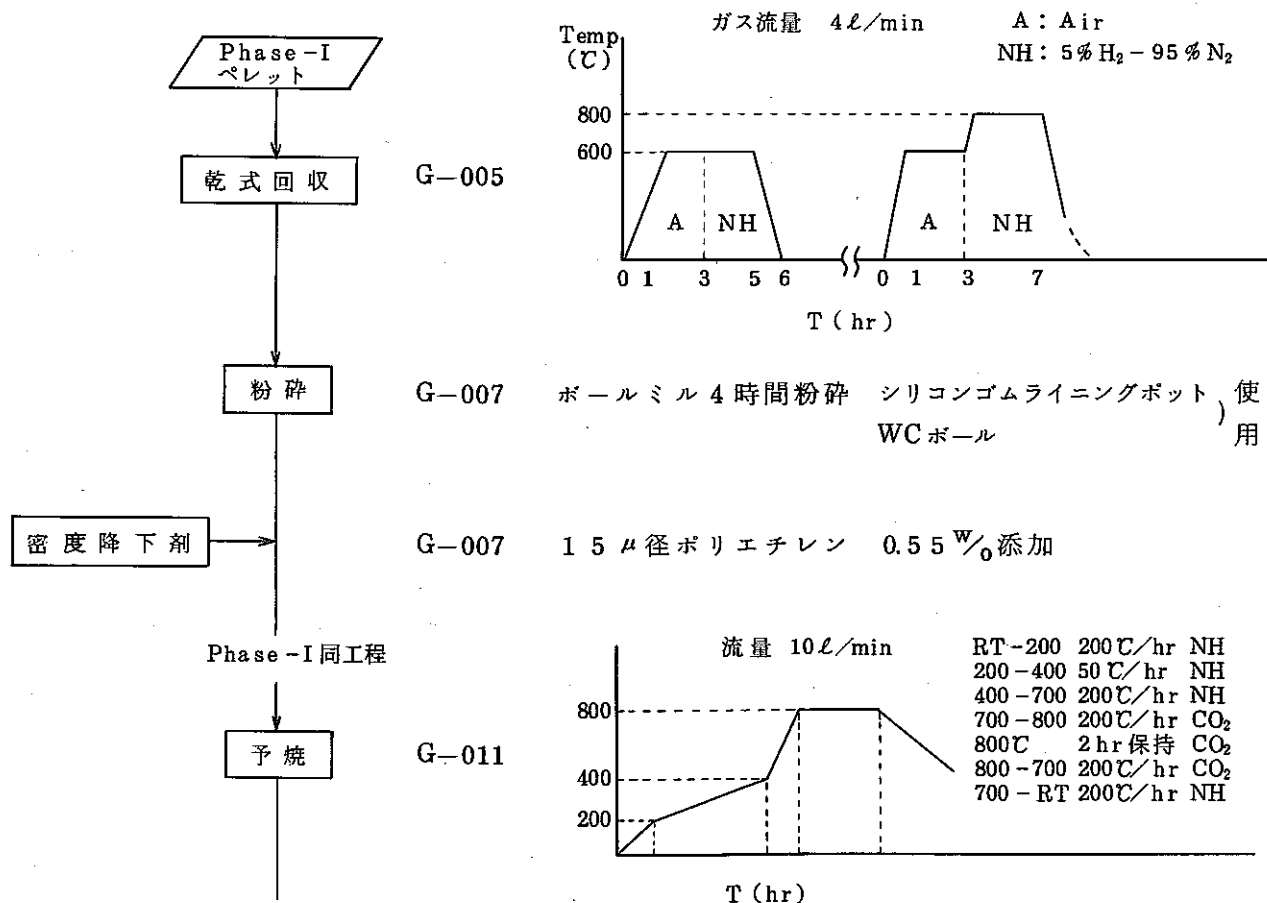
Fig- 5. 1. 2 ポリエチレン添加量 VS ペレット密度の関係

5-2 Phase-II

目的 クラック発生を出来るだけ少なくする条件の検討

方法 密度降下剤としてポリエチレンを添加しないペレットにはクラックは発生してないこと、又、クラックはボア部から発生していることから、クラックの発生にはポリエチレンが寄与していることは間違いない。クラック発生時期は、次の理由から成型、予焼工程であると考えられる。

成型時抜加重となつたときにペレットのスプリングバックが生ずる。MO₂とポリエチレンでは弾性率に大きな差があるので、これが原因すると考えられる。また、ポリエチレンは熱膨張率がMO₂より大きく、更に、分解、気化する。故に、これも原因となるであろう。焼結段階でごく小さいクラックはhealingするであろうから、ポリエチレン1コ当りの変位絶対量を小さくすれば目立つクラックの発生は防ぐことが可能となる。以上の考察のもとに、密度降下剤としてより径の小さい15μ径のポリエチレンを用い以下の方法で試験を進めた。原料粉はPhase-Iのペレットを乾式回収し使用した。



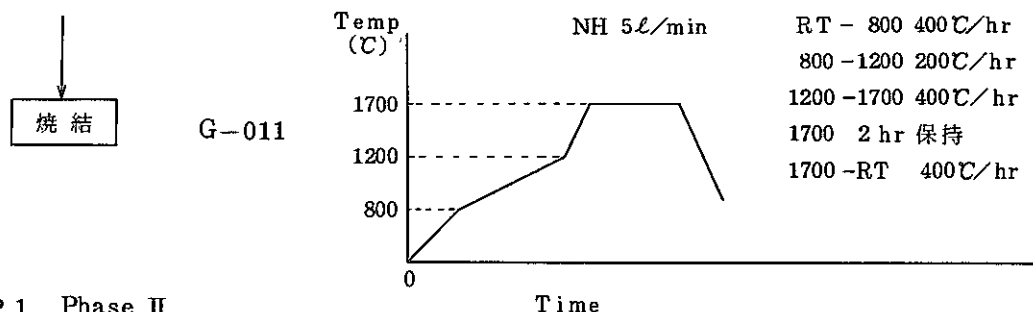


Fig.5.2.1 Phase II
ペレット製造フロシート

結果 Photo-5.2.1 に 15 μm 径ポリエチレン入りペレットの軸方向断面写真を示す。
Crack の発生は 100 μm 径に較べ非常に少なくサイズの効果が見われている。

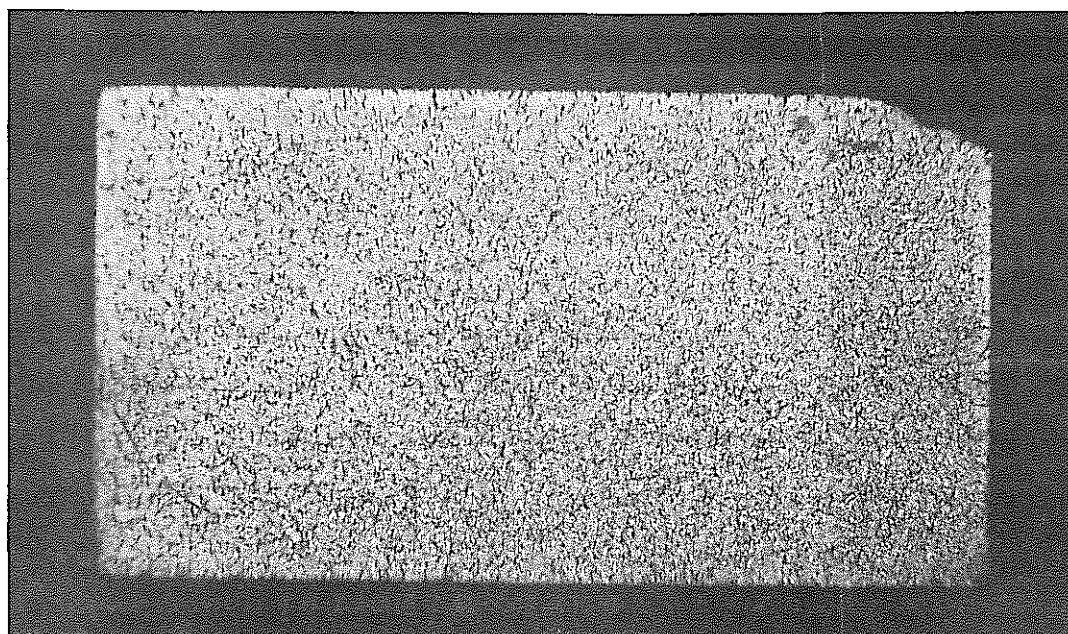


Photo-5.2.1 15μm ポリエチレン使用のペレット断面 1 mm

尚、今回予焼、焼結条件を変更したのは次の理由によるものである。ポリエチレンの分解は、Fig-5.2.2に示すようにある温度で急激に起こる。この急激な分解を避ける意味から昇温速度を 50 °C / hr と勾配をゆるくした。又、焼結現象が開始するといわれる 800°C ~ 1200°C の範囲を 200°C / hr と通常の半分の昇温速度にした。これは、もしこれらの温度でポリエチレンの成分が残っている場合には、未だ焼結の進まない段階で飛ばしてしまうという考えである。

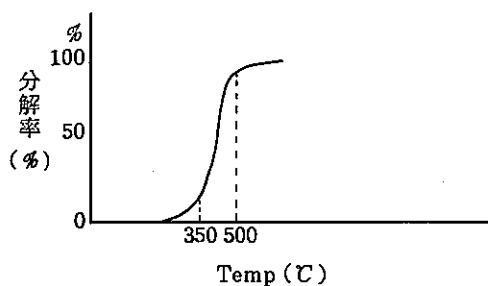


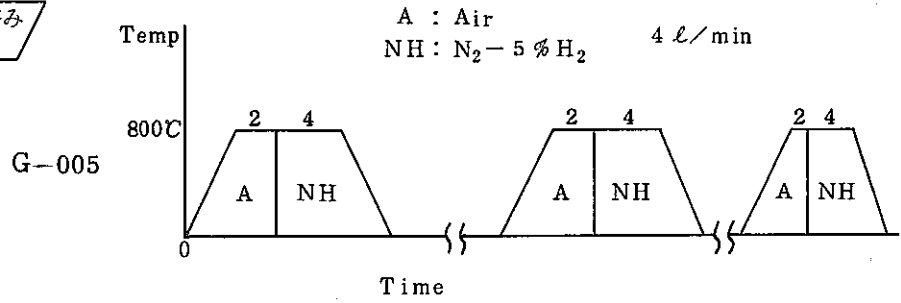
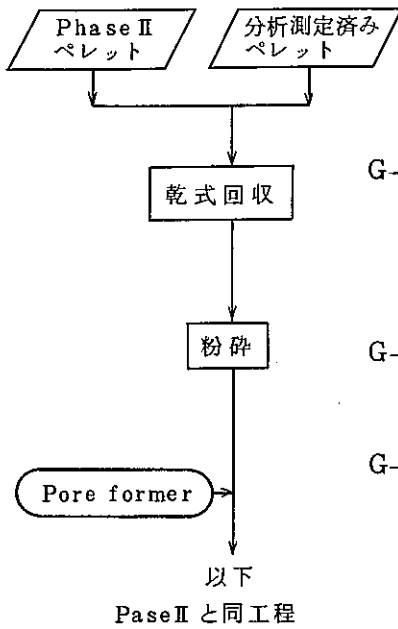
Fig-5.2.2 ポリエチレンの分解速度 (in air)

5-3 Phase-III

Phase - II でクラックに対しより良い方法が検討されたが、関係者間で打合せの結果、このキャンペーンと一連の関係にある G E T R 照射試験用ペレットが、100 μ 径ポリエチレンで密度調整をしてあるので、実験の主旨からは同様の金相組織である方がより好ましい。という理由から、ポリエチレンは100 μ 径を使用し無研磨で仕様を満たす方向で取組むことになった。

目的 100 μ 径ポリエチレンを使用し、焼結あがりで仕様を満たすペレットの製造。

方法 焼結あがりでの径コントロール法には、①ダイス径を変化させる方法と②グリーン密度を調整する方法がある。しかし、コントロールの容易さからはダイス径によるもののほうが決定的に有利である。しかし、ダイスセットは高価なものであるし、重量もあり一度ボックス内に入れば被放射性物質として取扱うことになるので保管に手間もかかることから各種取り揃えるのが容易ではない。そのため①と②を併用することにした。



G-007 S-Blender+W.Cボール, 6時間粉碎

G-007 100μ径ポリエチレンを以下の式にもとづいて添加する。

$$\frac{P}{M+P} \times 100 = p \text{ (w/o)}$$

- M ; 混合酸化物重量
- P ; ポリエチレン "
- p ; ポリエチレン濃度
- pはテストランの結果から求める。

Fig-5.3.1 Phase-IIIペレット製造フロシート

結果 ペレットのMatrix密度が上がりにくかったが、ポリエチレン0.8%と0.68%
 の2 Lot(PN-41およびPN-61)で必要製品量を作り得た。

6 履歴及び分析物性試験結果

N841-78-16

6-1 履歴

当キャンペーン各 Lot の工程履歴を Table - 6.1.1 に示す。

Table - 6.1.1

項目	Phase-I							
	PN-01-01	PN-01-02	PN-01-03	PN-01-04	PN-01-05	PN-11-01	PN-12-01	PN-13-01
原料粉, Lot サイズ	400 (グラム)	同 左	同 左	同 左	PN-01-04 から抽出した10コのペレット。	350		
混合	S-B + Al ₂ O ₃ 2hrs	"	"	"		S-B + Al ₂ O ₃ 2hrs		
粉碎	B + Al ₂ O ₃ 4hrs	"	"	"		B + Al ₂ O ₃ 4hrs	同 左	同 左
ポリエチレン量(%)	0	0.8 (100µm)	1.2	1.5		1.5 (15µm)		
ノニオン量(%)	2	2	2	2		2		
成型圧 (ton/cm ²)	2~3	同 左	同 左			2		
ダイス径 (mm)	6.17	"	"			6.40		
下パンチストローク (mm)	0.6	"	"			0.7	0.9	
予焼条件	G-11					G-11		
	RT-700 200°C/hr Ar-5%H ₂				N ₂ -5%H ₂	RT-400 200°C/hr N ₂ -5%H ₂		
	700-800 200°C/hr CO ₂				CO ₂	400°C 1hr soak "		
	800 2hrs Soak CO ₂	同 左	同 左	同 左	同 CO ₂	400-700 200°C/hr CO ₂		
	800-700 200°C/hr CO ₂				CO ₂	700-800 " "		
	700-RT 200°C/hr Ar-5%H ₂				N ₂ -5%H ₂	800 2hrs soak "		
						800-700°C 200°C/hr "		
						700-RT " N ₂ -5%H ₂		
焼結条件	G-11					G-48		
	RT-1600 400°C/hr Ar-5%H ₂				N ₂ -5%H ₂	RT-1650 400°C/hr N ₂ -5%H ₂		
	1600 2hrs Soak "				同 "	1650°C 2hrs soak "	同 左	同 左
	1600-RT 400°C/hr "				"	1650-RT 400°C/hr "		

項目	Phase - II			Phase - III				
	PN-20	PN-30	PN-31	PN-40	PN-41	PN-50	PN-60	PN-61
原料粉, Lotサイズ	乾式回収粉 430gr	乾式回収粉 100gr	同 左	乾式回収粉 470gr	乾式回収粉 494gr	乾式回収粉 250gr	乾式回収粉 250gr	同 左
混合粉	B+WC 4hrs	S-B+WC 4hrs	S-B+WC 4hrs	S-B+WC 6hrs	同 左	同 左	S-B+WC 6hrs	"
ポリエチレン量(w/o)	0.55(15 μ m)	0	0.3(100 μ m)	0.8(100 μ m)	"	0.73	0.4	0.68
ノニオン量(w/o)	2	2	2	2	"	2	2	2
成型圧 (ton/cm ²)	1.85	1.0	2	2	"	1.5	2.0, 2.5, 3.0	3
ダイス径 (mm)	5.75	5.75	5.75	5.8	5.75	同 左	5.72	5.75
下パンチストローク (mm)	0.6	0.6	0.6	0.7	0.5	"	同 左	0.5
予焼条件	G-11	同 左	同 左	同 左	同 左	"		同 左
	RT-200 200°C/hr NH	"	"	"	"	"		"
	200-400 50°C/hr NH	"	"	"	"	"		"
	400-800 200°C/hr	"	"	"	"	"		"
	700°C ガス切換え NH-CO ₂	"	"	"	"	"		"
焼結条件	G-48	同 左	同 左	G-11	"	同 左		同 左
	RT-1700 400°C/hr NH	"	"	RT-800 400°C/hr NH	"	"		"
	1700°C 2hrs soak	"	"	800-1200 200°C/hr "	"	"		"
	1700-RT 400°C/hr NH	"	"	1200-1700 400°C/hr "	"	"		"
				1700 2hrs soak "	"	"		"
				1700-RT 400°C/hr "	"	"		"

6-2 分析測定結果

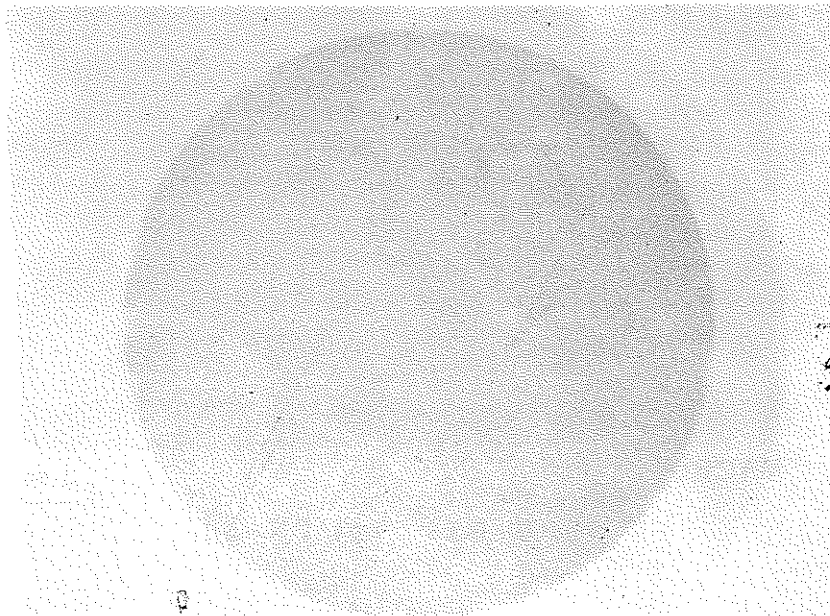
Table-6.2.1 物性分析結果

Item	Lot	Spec (MO ₂)	NUO ₂	90EUO ₂	PuO ₂	60EUO ₂	PN-01-01	PN-01-04	PN-11-01	乾式回収	PN-20(粉)	PN-20(P)	PN-40	PN-41	PN-50	乾式回収	PN-60	PN-61
B・E・T (m ² /g)			4.49	6.12		6.01	7.93						1.29		1.18		1.65	
(μ)			0.12	0.09		0.09	0.07						0.42		0.46		0.33	
S・S・S (m ² /g)			0.96	1.84		1.34	1.15						1.46		1.26		0.43	
(μ)			0.57	0.30		0.41	0.46						0.37		0.43		1.14	
X-Ray Homogeneity																		
Lattice Constant																		
Ceramograph																		縦横クラック 脆い
Autoradiograph														スポットなし				スポットなし
O/M	198±002						1.96		1.97					1.98				1.97
(b.s)			2.16	2.05			2.26			1.997 1.997 1.998								
PuO ₂ (w/o)	30±1					U { ^{59.78} ^{59.89} ^{59.92} AV ^{59.86}	{26.19 26.30 26.30	29.64	30.05					30.23				30.17
Pu							{26.19 26.30 26.30	26.14	26.5					26.66				26.61
GAS (IncH ₂ O)(μL/g)	<150						117		<160					<10, <10			30 (20 10	60 <10 <10
AL (ppm)	<200				<50		<50		95	70	370	410	95	60		65	65	220
B	<10				<1		<1			1	<1	<1	<1	<1		<1	<1	<1
CD	<10						<5			5	<5	<5	<5	<5		<5	<5	<5
CR	<200				50					50	30	<20	45	40		<70	70	50
FE	<500				120		270			190	120	85	150	140		200	200	180
MG	<25				<10		<10			<10	20	25	14	10		10	10	<10
NI	<200				30		<20			75	<20	<20	60	25		80	80	55
V	<100				50		<50			50	<50	<50	<50	<5		<50	<50	65
CU+ZN+S I	<600				5+100 +60		<155			215	<1005	<835	<267	<175		225	<225	<165
AG+MN+MO+PB+SN	<200				1+10		<81			101	<71	<81	<71	<71		71	<71	<71
C	<150				360		61							70				45
CL	<25				25									<25				<25
F	<25				10									<10				<10
N	<100				50									<50				<50
Remarks										600°C 2hrs ×2サイクル 800°C 4hrs 還元	ボールミル + WCボール 4 hrs							

N841-78-16

6-3 オートラジオグラフ

製品 Lot の α -オートラジオグラフ観察の結果と写真を以下に示す。いずれの Lot も、U、P スポットは存在せず混合状態は良好である。



MACRO

2 mm

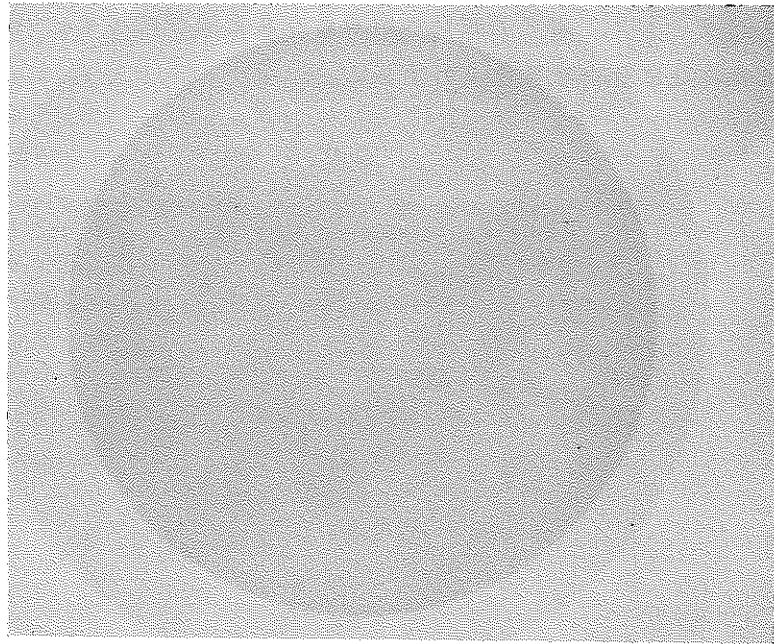
Photo-6.3.1 Lot PN-41



MICRO

100 μ

Photo-6.3.2 Lot PN-41



MACRO

2 mm

Photo-6.3.3 Lot PN-61



MICRO

100 μ

Photo-6.3.4 Lot PN-61

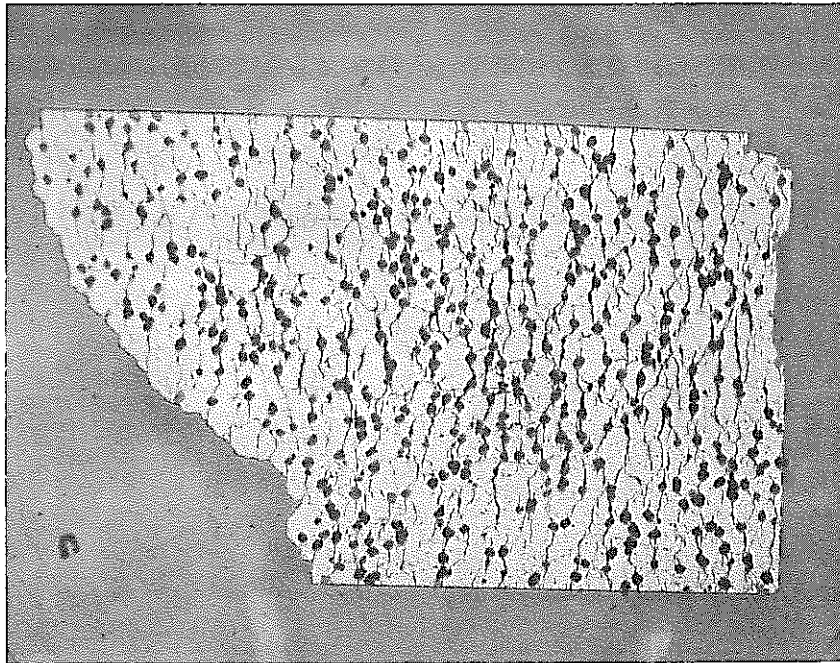
6-4 金相試験結果

製品ロットの金相試験結果と写真を以下に示す。

Table-6.4.1 製品ロットの金相試験結果

項目 \ Lot名	PN-41	PN-61
ポイド分布	均 一	均 一
結 晶 粒	平均 10 μ	平均 10 μ
不 純 物	メタル 5 μ以下 1コ	
そ の 他	クラックは造粒跡に沿った状態で連続している。	横方向にマクロクラック在る。

ペレット軸方向の断面写真 (Photo-6.4.1, 6.4.2) からポア形状は扁平で、長軸方向のクラックがポア間を連結していることがわかる。Pore の形状としては球を期待したが、成型時の圧力によりこのような形となったと推定される。



MACRO

1 mm

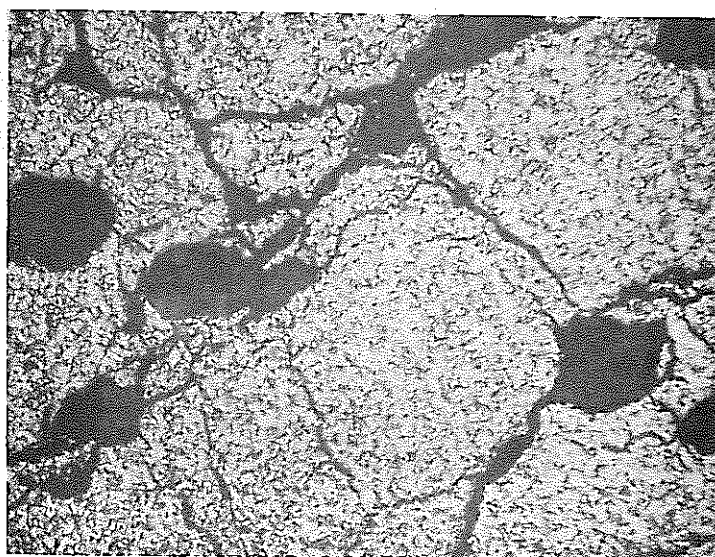
Photo-6.4.1 PN-41ペレットの金相 (マクロ)



MICRO

100 μ

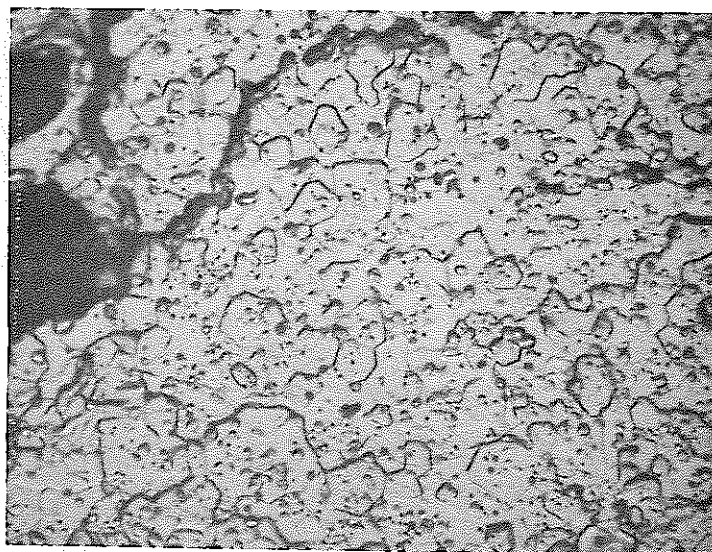
Photo-6.4.2 PN-41ペレット金相(マイクロ)



MICRO

100 μ

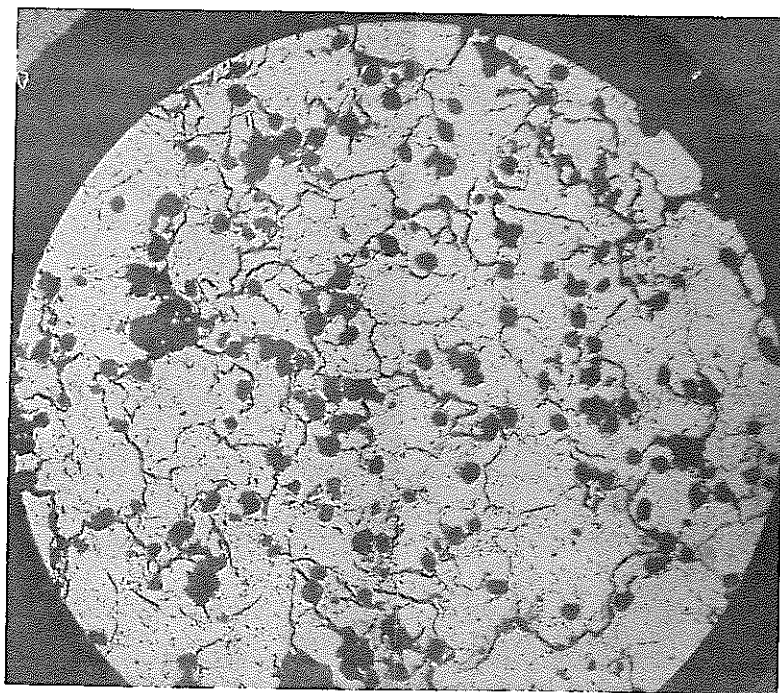
Photo-6.4.3



MICRO

25 μ

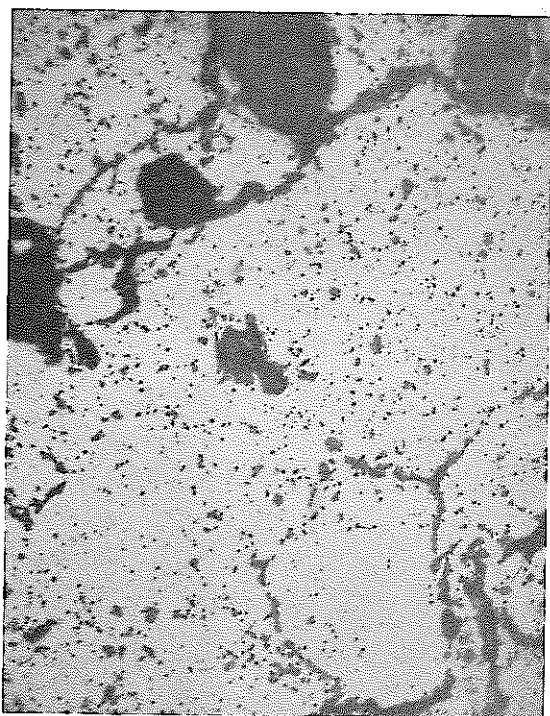
Photo-6.4.4



MACRO

500 μ

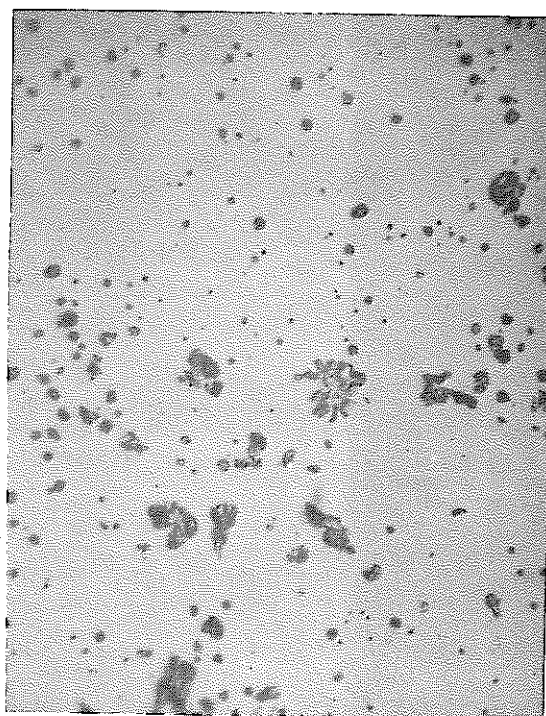
Photo-6.4.5 PN-61ペレット金相(マクロ)
As. polished.



MICRO

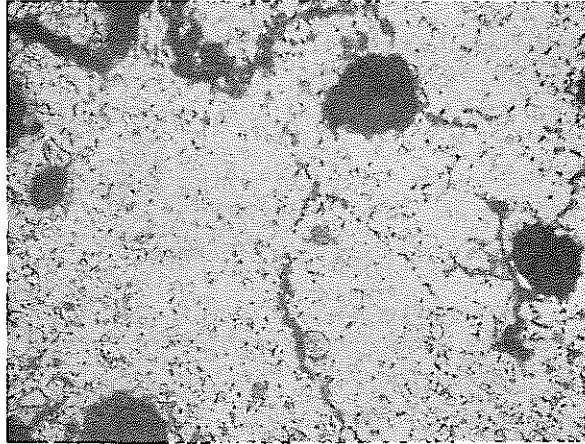
100 μ

Photo-6.4.6 PN-61ペレット
金相(ミクロ)
As. Polished



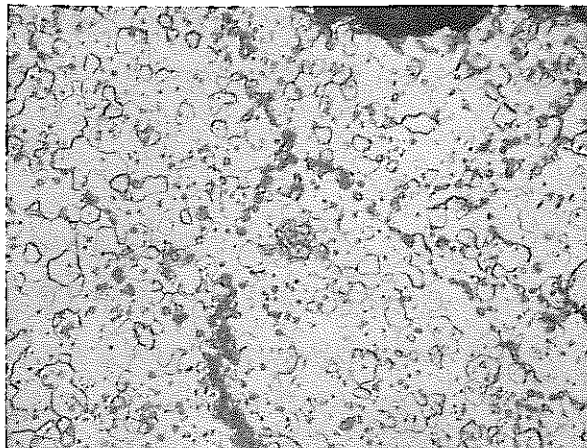
25 μ

Photo-6.4.7 PN-61ペレット
金相(ミクロ)
As. Polished.



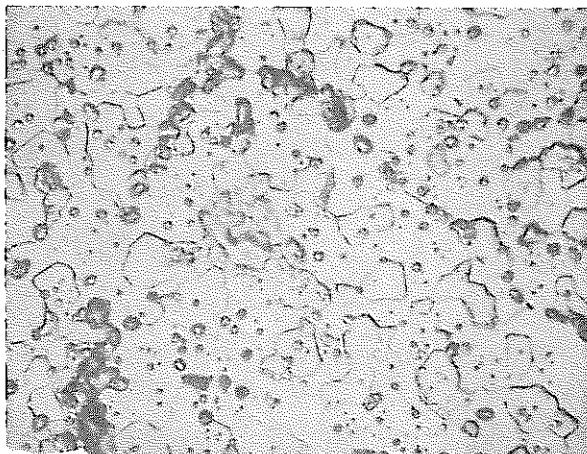
100 μ

Photo-6.4.8 PN-61 ペレット金相
As. Etched



50 μ

Photo-6.4.9 PN-61 ペレット金相
As. Etched



25 μ

Photo-6.4.10 PN-61 ペレット金相
As. Etched

6-5 X線回折結果

X線回折結果は以下の通りである。

Table-6.5.1

Lot 名	格子定数 (\AA)	固溶率 (%)	O/M
PN-41	5.44966 \pm 0.00025	100	1.993
PN-61	5.45402 \pm 0.00076	100	1.977

620面の回折線をFig-6.5.1~6.5.2に示す。PN-41は $K\alpha_1$, $K\alpha_2$ 線による分離の良いシャープな結果が得られており、 UO_2 の回折線位置である。126.0°($K\alpha_1$), 126.7°($K\alpha_2$)付近で回折線は見られず126.7°($K\alpha_1$), 127.28°($K\alpha_2$)に $MO_{2.00}$ のみの回折線が検出されている固溶体一相のピークであることがわかる。

PN-61では、 $K\alpha_1$, $K\alpha_2$ の分離も悪くブロードな結果になっている。回折角度においてもはっきりしたピークを示していない。また低角度側へずれている。しかし UO_2 の回折角度ではなく、残存 UO_2 はない。これは O/M が2.00より若干低く、格子定数が大きくなっているため低角度側へずれているものである。

詳しく解析してみると $MO_{1.96}$ ~ $MO_{2.00}$ 程度の回折線が連続的に合成された形になっており、概略はFig-6.5.3の様になる。今回測定されている格子定数、 O/M 値はピークの平均的な所の値であり、 $O/M=1.977$ の結果が得られた。 O/M 値算出にあたってはG.DEAN Report CEA-R2737を使用し固溶度は実験による回折図形との比較において求めた。

620面回折チャート

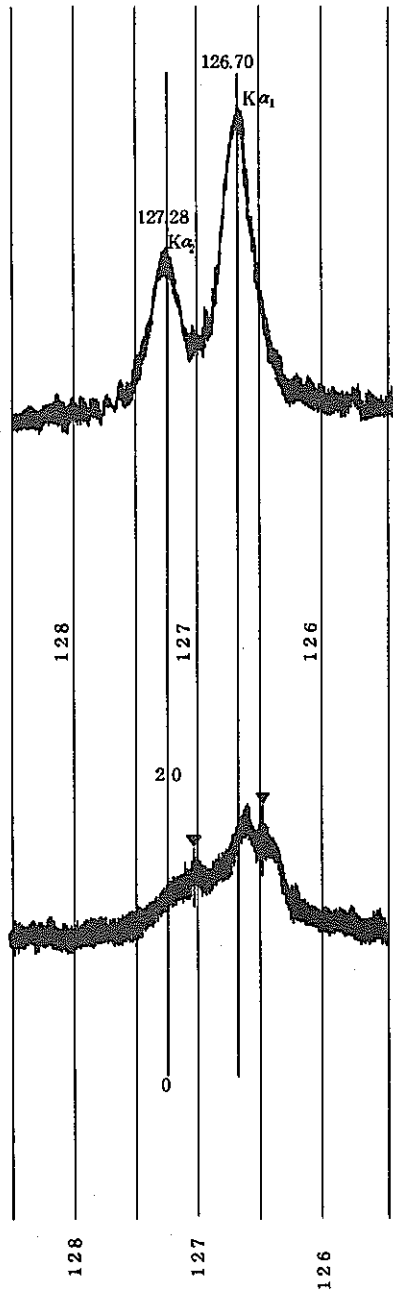


Fig - 6.5.1

Fig - 6.5.2

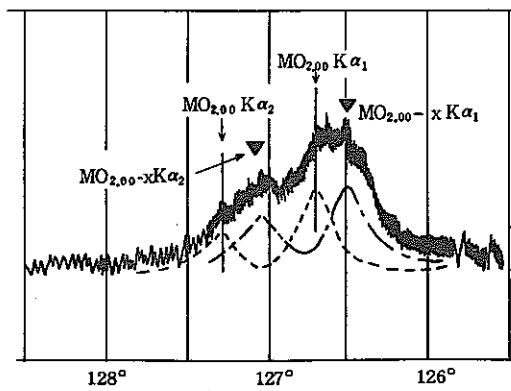


Fig. - 6.5.3

7 ま と め

7-1 乾式回収について

Phase - I と Phase - II では焙焼-還元サイクルによる乾式回収のしやすさが異なり、後者は困難であった。Fig-7.1.1及び7.1.2 に熱処理条件を示す。

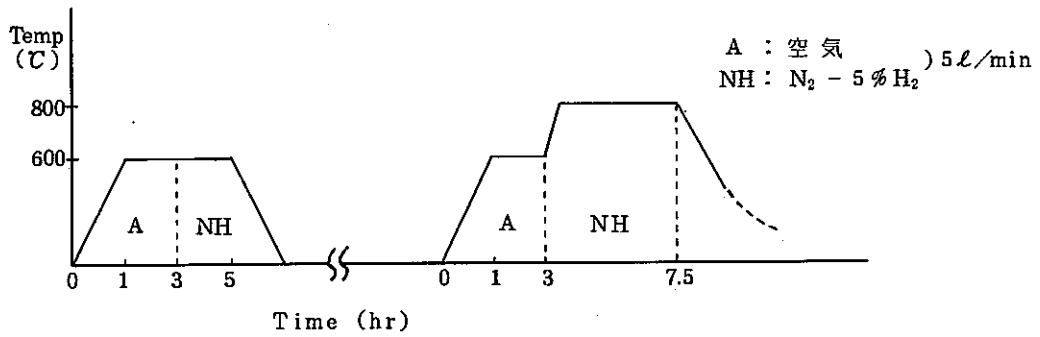


Fig-7.1.1 Phase-Iの乾式回収条件

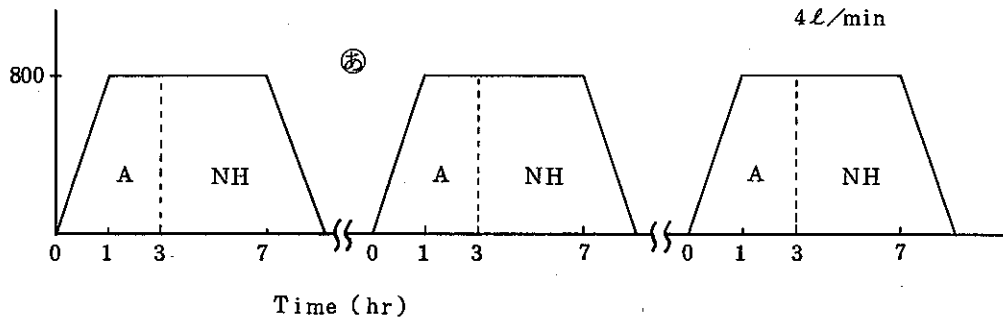


Fig-7.1.2 Phase-IIの乾式回収条件

Phase - I はペレットのままのチャージで乾式回収された。Phase - II 試料では、Fig-7.1.2の㊸点での観察では、ペレットは原型を保持しており粉碎されなかったため、エリスマーターで $\sim 5\text{mm}$ に砕き以後のサイクルを行なった。その結果大部分 0.2mm 以下となり回収可能となった。また、最初から塊状にし、Fig-7.1.3の条件で行なった3回目のものは粉化が進み、処理条件としては良好であった。

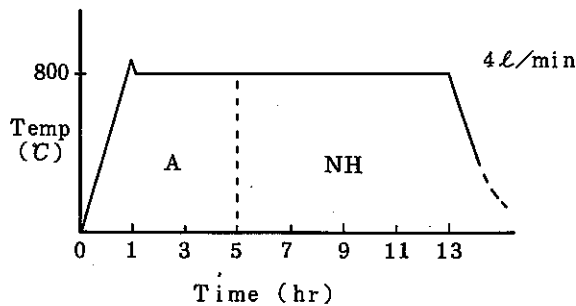
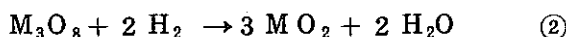
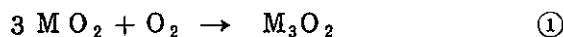


Fig-7.1.3 Phase-II Pelletの乾式回収条件 (Pellet破碎後熱処理)

以上の結果から次のことがいえる。

- (イ) Pu濃度が高くなると乾式回収は難かしくなる。
- (ロ) 焼結-乾式回収-焼結-乾式回収のサイクルをくり返すに従って、回収がしにくくなる傾向を持つ。

酸化還元過程では、次の反応が起こり



これらの相変化に伴う格子定数の変化を利用し、ペレットを粉化する。これが乾式回収の考え方である。還元程度を知る目的で②式の H_2O を測定した。8時間の還元でも未だ平衡に達せず H_2O 濃度の減少が見られた。 $(U_{1-y}Pu_y)O_2 \pm x$ では、 $O/M = 2.0$ で共に4価で存在するが、 $O/M < 2$ では、Puが選択的に還元されUは還元されない。 $O/M > 2$ では、Uが酸化されPuは変化しないと考えるから、粉化に寄与するのはUだけといえる。であるから、プルトニウム濃度が高くなればなるほど変化の割合が少なくなり回収が難かしくなる。また、焼結-乾式回収のサイクル数が増えるということは、高温部におかれている時間が長くなることであり、結晶は成長し、歪のない完全なものへ近づいて行くことになる。それ故に、少し位の物理的ショックでは破壊されにくくなると考えられる。尚、乾式回収粉は再使用に際してボールミルやS-Blenderで粉砕するのであるが粉砕後は、B・E・T値が $1 \sim 2 m^2/g$ 程度であることからわかるように十分に粉砕されたものではなく、結晶成長した粗い粉を再びペレットにしたものと考えられるから上述のような傾向が顕著に現われると推察される。

7-2 ペレット形状について

焼結ペレットの形状を観察すると次の2種類に分けることができた。Fig-7.2.1は原料粉を用いたとき、Fig-7.2.2は乾式回収粉を用いたときのものである。但し、ここでいう原料粉とは、試料係で受入れたそのままの粉末であり、乾式回収粉とは、一度成型、焼結工程を経た後に乾式回収したものである。

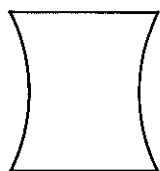


Fig-7.2.1

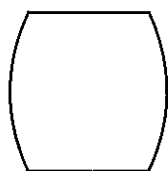


Fig-7.2.2

成型時のペレット内圧力分布は、既略Fig-7.2.3のようになると考えられる。上下端面では中心部に較べ大きな圧力が加わるので、グリーン密度もこれに比例して高くなっている。焼結性の良い原料粉ならば焼結到達密度はグリーン密度には大きく影響されない。従って中心部は収縮が大きく起こりFig-7.2.1の形になる。逆に、焼結性の悪い乾式回収粉は焼結に



Fig-7.2.3

際しての Mass transfer には粉末間の距離が大きく影響するので、密度の低い中心部は結果として焼結が進みにくく Fig-7.2.2 のようになると推測される。

7-3 G-11 炉使用上の留意点

予備試験と本番では結果が異なることが多々あった。原因の一つは、G-11 横型焼結炉特有の性質によるものであることがわかった。焼結は

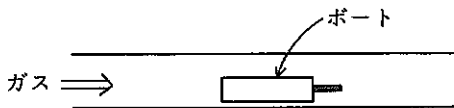


Fig-7.3.1

Fig-7.3.1 の状態で行なう。ポートは均熱部に位置しているのであるがガスに早く接する側 (図の左側に位置するペレット) のペレットは焼結が進みやすい (高密度になる) ので、データの取扱いには注意が必要である。

7-4 密度降下剤添加による密度調整方法について

SN841-75-39 にポリエチレンを使用したときの密度コントロール法を報告した。今回これに若干検討を加えたのでその結果を以下に述べる。あわせて焼結前後の重量変化を利用し、焼結ペレットの $\frac{O}{M}$ を推定する方法も検討した。

理論

ペレット中に含まれている添加物 (Pore former) は、加熱過程でガス化して飛びさり、その占めていた Volume が空孔として残る。であるから、ペレット重量はその分を Matrix Density に置き換えたと等価な重量だけ減じたものとなる。故に添加物 (Pore former) の種類、量、サイズを適当に選択することによりペレット密度をコントロールすることは可能となる。

ここで次の定義をする。

- G ; グリーンの状態
- S ; 焼結後の "

P ; Pore former

p ; " " の添加率 (%)

N ; 造粒剤 (ノニオン S - 4.0)

n ; " 添加率 (%)

H ; 水 分

h ; 吸着水分量 (%)

M ; Matrix

A ; 核物質モル数

m ; 核物質原子量 (g / mol)

W ; 重 量 (g)

V ; 体 積 (cm³)

ρ ; 密 度 (g / cm³)

δ ; 収縮係数 (V_s / V_g)

U ; 目的とする状態

x ; 焼結前 O/M

y ; " 後 O/M

MO; 混合酸化物

グリーンペレットは次の形で表わされ

$$W_G = W_{MOx} + W_P + W_N + W_H \quad (1)$$

$$\text{焼結すれば } W_S = W_{MOy} \quad (2)$$

になるものとする。又、

$$\frac{W_P}{W_{MOx} + W_H + W_P} \times 100 = p \quad (3) \quad \therefore W_P = \frac{p}{100 - p} (W_{MOx} + W_H) \quad (4)$$

$$\frac{W_N}{W_{MOx} + W_H + W_N} \times 100 = n \quad (5) \quad \therefore W_N = \frac{n}{100 - n} (W_{MOx} + W_H) \quad (6)$$

$$W_H = \frac{h}{100} \cdot W_{MOx} \quad (7)$$

であるから、(4)、(6)、(7)より

$$W_P = \frac{p}{(100 - p)} \cdot \frac{(100 + h)}{100} W_{MOx} \quad (8)$$

$$W_N = \frac{n}{100 - n} \cdot \frac{(100 + h)}{100} W_{MOx} \quad (9)$$

と表わされる。(7)、(8)、(9)を(1)式に代入して

$$W_G = W_{MOx} + \frac{p}{100-p} \cdot \frac{(100+h)}{100} \cdot W_{MOx} + \frac{n}{100-n} \cdot \frac{(100+h)}{100} \cdot W_{MOx} + \frac{h}{100} \cdot W_{MOx} \quad (10)$$

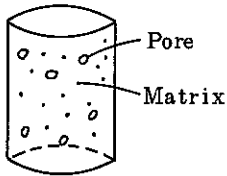
となり，整理して

$$W_{MOx} = \frac{W_G}{1 + \frac{p}{100-p} \cdot \frac{(100+h)}{100} + \frac{n}{100-n} \cdot \frac{(100+h)}{100} + \frac{h}{100}} \quad (11)$$

となる。

I Matrix Density の求め方

ポア・フォーマによるポア総体積を取り除いたときの密度が Matrix Density となるから



$$\rho_M = \frac{W_S}{V_S - V_P \cdot \delta} \quad (12)$$

また，

$$V_P = \frac{W_P}{\rho_P} \quad (13)$$

と表わせるから⑧，⑫，⑬式を組合せ

$$\rho_M = \frac{W_S}{V_S - \frac{p}{(100-p)} \cdot \frac{(100+h)}{100} \cdot W_{MOx} \cdot \frac{\delta}{\rho_P}} \quad (14)$$

更に⑪式を代入し整理すると，

$$\rho_M = \frac{W_S}{V_S - \frac{p}{100-p} \cdot \frac{100+h}{100} \cdot \frac{\delta}{\rho_P} \left\{ \frac{W_G}{1 + \frac{p}{100-p} \cdot \frac{100+h}{100} + \frac{n}{100-n} \cdot \frac{100+h}{100} \cdot \frac{h}{100}} \right\}} \quad (15)$$

or

$$\rho_M = \frac{1}{\frac{1}{\rho_S} - \frac{\delta}{\rho_P} \cdot \frac{W_G}{W_S} \cdot \frac{p}{100-p} \cdot \frac{100+h}{100} \left\{ \frac{1}{1 + \frac{p}{100-p} \cdot \frac{100+h}{100} + \frac{n}{100-n} \cdot \frac{100+h}{100} \cdot \frac{h}{100}} \right\}} \quad (16)$$

となる。

II ポリエチレン量の推定法

Matrix 中にポアを分散させることにより密度を下げるができるから，

$$\rho_U = \frac{W_M}{V_M + V_{U \cdot P}} \quad (17)$$

ここで， $V_{U \cdot P} = V_P \cdot \delta$ となるから代入して

$$\rho_U = \frac{W_M}{V_M + V_P \cdot \delta} \quad (18)$$

$$\therefore V_P = \left(\frac{W_M - \rho_U \cdot V_M}{\rho_U} \right) \frac{1}{\delta} \quad (19)$$

必要なポリエチレン量は、焼結前の粉末に対し重量パーセントで表わすので、 O/M 、水分の補正をすると、

$$p_U = \frac{\frac{W_M - \rho_U \cdot V_M}{\delta} \cdot \frac{\rho_P}{\rho_U}}{\frac{m+16x}{m+16y} \left(1 + \frac{h}{100}\right) \cdot W_M + \frac{W_M - \rho_U \cdot V_M}{\delta} \cdot \frac{\rho_P}{\rho_U}} \times 100 \quad (20)$$

整理すると、

$$p_U = \frac{\left(1 - \frac{\rho_U}{\rho_M}\right) \cdot \frac{\rho_P}{\rho_U} \cdot \frac{1}{\delta}}{\frac{m+16x}{m+16y} \left(1 + \frac{h}{100}\right) + \left(1 - \frac{\rho_U}{\rho_M}\right) \frac{\rho_P}{\rho_U} \cdot \frac{1}{\delta}} \times 100 \quad (21)$$

となる。しかし、pore formerとして100 μ のポリエチレンを使用した場合にはクラックの発生があるので、これらの式で推定するよりも小さなペレット密度となる。今回の燃料製造の実績からはポリエチレン添加率0.3w/oに対しCrackによるペレット密度降下は、約1% T.Dであった。

III O/M の推定について

焼結前後の重量変化分の中から、添加物と吸着水分による変化分を除けば残りは O/M 変化によるものであるとすると

$$A(m+16 \times x) = W_{MOx} \quad (22)$$

$$A(m+16 \times y) = W_{MOy} \quad (23)$$

$$\therefore y = \frac{1}{16} \left\{ \frac{W_{MOy}}{W_{MOx}} (m+16 \times x) - m \right\} \quad (24)$$

として求まる。

7-5 密度, O/M , 不純物ガスについて

低密度ペレットの製造において、Table-7.5.1に示すように O/M が低くなるに従ってGAS量は多くなる傾向が見られた。定性的には次の様に考えられる。

焼結時の O/M 変化が大きい程、即ち、Low O/M になるにつれて結晶中の欠陥（空孔）の割合が増える。欠陥部はポテンシャルの高い不安定な状態であると考えて良いから、そこに気体はトラップされ易くなる。従ってLow O/M になる程吸着ガス量が増える。

尚、吸着ガスに関し、ガスの主成分は窒素、水（〔1〕,〔2〕）であり、水素は $(U, Pu)O_{2-x}$ と吸着水分との反応により生じたものであるといわれている。また、 $(U, Pu)O_{2-x}H_x$ という化合物が存在し230℃以上では窒素と反応するという説もあり〔3〕、一般に低 O/M ペレットは、不純物ガス量が多いことが知られている。

Table-7.5.1 30%PuO₂-UO₂ペレットの O/M 比とガス量との関係
(過去製造の実績)

O/M	1.92	1.934	1.96	1.96	1.97	1.98	1.98	1.99
GAS	>700	>500	150	117	160	36	<10	<10
備考	GETR (GT-40)	GETR (GT-30)	GETR 加湿再焼結 (GT-40)	PN-6.7 PN- (0101)	PN-6.7 PN- (11-01)	GETR 乾式回収粉 (GT-61)	PN-6.7 (PN-41)	GETR 加湿再焼結 (GT-80)

G-11 炉を用いて焼結したペレットの O/M 値は、1.95~1.97 であつた。このときの焼結条件（焼結湿度 1650℃, 焼結ガス N₂-5%H₂, H₂O 濃度 300 ppm) を Blackburn Model にあてはめてみると Fig-7.5.1 に示すように $O/M = 1.95$ 程度となり比較的良い一致を見る。密度と O/M 値に関する相関々係は本製造試験においては見られなかつた。

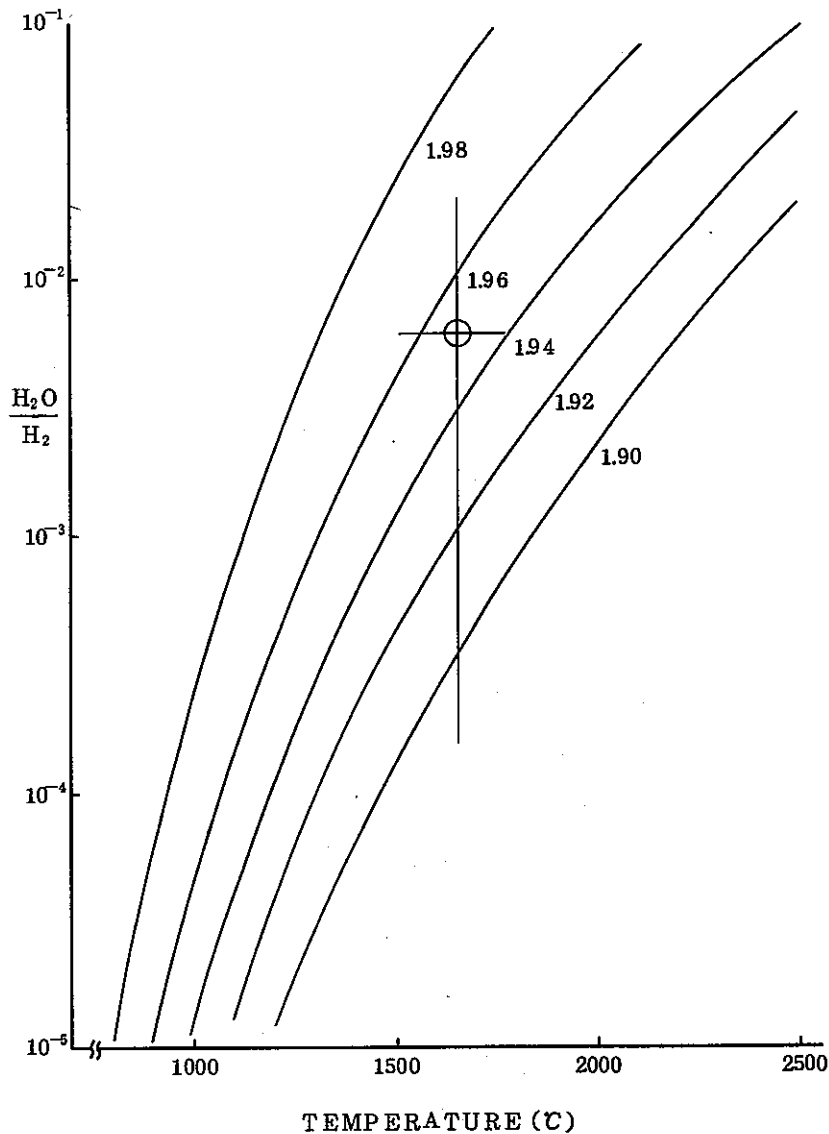


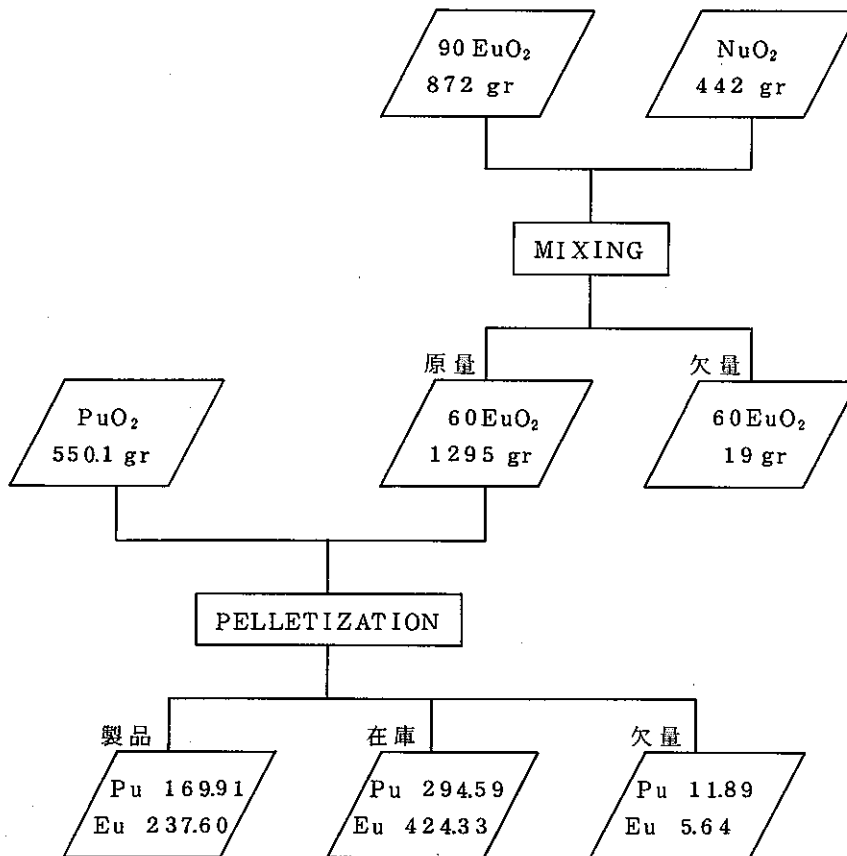
Fig-7.5.1 The variation in composition of $(U_{0.7}Pu_{0.3})O_{2-x}$ with temperature at various O/M ratios. (from BLACKBURN MODEL)

References

- (1) PECHIN. W.H, BRADLEY. R. A, LACKEY. W. Y, SEASE. J. D
"Analysis of (U.Pu) O_2 fuels at Oak Ridge National Laboratory" Analytical methods in the Nuclear Fuel Cycle (proc, Symp vienna 1971) IAEA. Vienna (1972) 279.
- (2) P. Funk, W. Lins, V.W Schneider Alken Gmb Grossauheim Fedral Republic of Germany "Production of Mixed Oxide Fuel For Fast Reactors" IAEA-SM-173/21.
- (3) BROWN, F. Ockenden, H.N. Welch, G.A.J. Chem Soe (1955) 4196.
- (4) P.E. Blackburn and C.E. Johnson. "Chemical Modeling of Uranium, Plutonium and Oxygen Redistribution in Oxide Fuel by Vapor Transport and Diffusion". IAEA. Symp on Thermodynamic of nuclear materials vienna, Austria Oct 21-25. 1974.

8 核物質収支

製造条件などの変更などがあり，乾式回収をくり返し行なったため核物質の流れは複雑になったが，整理すると以下のようになった。



欠量は

$$\text{Pu} = \frac{11.89}{550.1 \times 0.866} \times 100 \approx 2.5\%$$

$$\text{Eu} = \frac{19 \times 0.876 \times 0.6 + 5.64}{1314 \times 0.876 \times 0.6} \times 100 \approx 2.3\%$$

9 あ と が き

製造途中で使用機器の変更や、それに供う製造条件の変更があり、取扱いLoT数、期間とも当初の予定を上まわる結果となった。これには、焼結工程で使用したG-11炉がポート内の位置によっても焼結の進み具合が異なるといった現象があるということを理解していなかったことや、無研磨で仕様を満たす方法に変えたこと、又、手持ダイスとの関係から、焼結ペレットの径コントロールにグリーン密度を操作する方法を取ったことなどがあげられる。しかし、乾式回収粉の使用や、ポリエチレン使用に関し、有益な知見が得られたことは今後の業務に役立つものと確信する。

本プロジェクトの遂行にあたり、協力頂いた品質管理課、製造一課関係者各位に感謝致します。

10 付 録

10-1 被曝線量の推定および結果

I 条 件

i) Pu の同位体組成

$$^{238}\text{Pu} \quad 0.1 \quad (\text{w/o})$$

$$^{239}\text{Pu} \quad 76.0$$

$$^{240}\text{Pu} \quad 19.5$$

$$^{241}\text{Pu} \quad 3.5$$

$$^{242}\text{Pu} \quad 0.5$$

ii) ^{241}Am 精製日 1975年5月1日

経過日数 240日(1975年12月31日現在)

iii) ロットの大きさ 500g as MO_2

II 計 算 式

i) 表面線量率

$$\begin{aligned} D_r &= \{ 1.24 \cdot P_{238} + 0.012 \cdot P_{239} + 0.011 \cdot P_{240} + 0.018 \cdot P_{242} + 0.016 \cdot P_{241} \cdot t \\ &\quad + 2.55 (1 - e^{-0.102t}) \cdot P_{241} \} \\ &= 219.4 \text{ mrem/hr/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_n &= 0.193 \cdot P_{238} + 0.0005 \cdot P_{239} + 0.0132 \cdot P_{240} + 0.0188 \cdot P_{242} \\ &= 3.2 \text{ mrem/hr/g} \cdot \text{Pu} \end{aligned}$$

ii) 空間線量率

$$\begin{aligned} E_\gamma &= S_\gamma \cdot T \cdot B \\ &= D_\gamma \cdot \frac{A}{R^2} \cdot C \cdot K \cdot T \cdot B \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_n &= S_n \cdot T \cdot B \\ &= D_n \cdot \frac{M}{R^2} \cdot C \cdot T \cdot B \end{aligned}$$

但し, C ; PuO_2 富化度 (%) R ; 線源からの距離 (cm)
 K ; 遮蔽係数 T ; 作業時間 (hr)
 A ; 表面積 (cm^2) B ; パッチ数
 M ; Pu 量 (g)

iii) 被曝量計算結果 次表に示す。

$$E_r = 219.4 \times \frac{A}{R^2} \cdot C \cdot K \cdot T \cdot B$$

$$E_n = 3.2 \times \frac{M}{R^2} \times 0.882 \times C \cdot T \cdot B$$

Table - 1 0.1.1

工 程	取扱量 MO ₂ (g)	表面積 A (cm ²)	距 離 R (cm)	PuO ₂ 富化度 C	遮 蔽 度 * K	作業環境線量率		作業時間 T (min)	バッチ数 B	被 曝 量 (mrem)		
						γ	n			γ	n	γ + n
均 一 化 混 合	500	900	30	1.0	0.34	74.6	1.6	60	4	298.4	6.3	304.7
造 粒	500	100	30	0.3	0.34	2.5	0.5	60	4	9.9	1.9	11.8
成 型	500	600	30	0.3	0.34	14.9	0.5	120	4	119.4	3.8	123.2
密 度 測 定	100	30	30	0.3	0.34	0.7	0.1	120	4	6.0	0.8	6.8
予 焼	500	30	30	0.3	0.34	0.7	0.5	30	4	1.5	0.9	2.4
焼 結	500	30	30	0.3	0.34	0.7	0.5	30	4	1.5	0.9	2.4
密 度 測 定	500	30	30	0.3	0.34	0.7	0.5	120	4	6.0	3.8	9.8
研 摩	500	30	30	0.3	0.34	0.7	0.5	240	4	11.9	7.5	19.4
ス タ ッ ク 調 整	500	300	30	0.3	0.34	7.5	0.5	60	4	29.8	1.9	31.7
移 動 I (GP47~GP30)	500	500	30	1.0	0.34	41.4	1.6	10	4	27.6	1.0	28.6
移 動 II (GP11~GP47)	500	500	30	1.0	0.34	41.4	1.6	10	4	27.6	1.0	28.6
移 動 III (サンプル 移 動)	10	10	30	1.0	0.34	0.8	0.0	10	4	0.6	0.0	0.6
									計	540.2	29.8	570.0

* K: 鉛板 (2mm厚) 又は, 鉛ガラスのある場所での作業 0.34

Table-10.1.1には、MO量500gr/LoTで4LoT取扱いときの推定総被曝線量を示した。ガンマ線、中性子線の合計で570mremとなる。本キャンペーンを通しての被曝量合計は1200mremであった。推定値よりも実際の値は2倍程度大きくなったが、これは取扱いLoT数が15LoTと大巾に増えたことによるものである。単位LoTあたりの被曝量を比較してみると

推定値 140mrem/LoT

実際値 80mrem/LoT

となり、推定値はおおよそ2倍程度、多目に見積っていることになる。しかし、実際の被曝量には、次の要素が含まれているので、その点、考慮する必要がある。

- ① 中性子線の効果は無視した。
- ② 取扱い量は、以下の通りである。

470gr 2LoT

400gr 5LoT

350gr 3LoT

250gr 3LoT

100gr 2LoT

- ③ 本キャンペーンと並行して行なった、GETR照射試験燃料製造、Low⁰/_M実験の作業を含んでいる。

なお3ヶ月毎に測定している個人被曝線量の結果では、期中の最大は70mrem/3ヶ月であり、特に問題となる被曝はなかった。

10-2 燃料の理論密度

ペレットの理論密度は、

SN852-74-03 プルトニウム燃料設計管理アニュアル

F-0303-1973 混合酸化物(PuO₂-UO₂)の理論密度

に基づいて、NUDEコードで計算し、次の値とする。

理論密度(100% T.D.) = 1.104g/cc

前提条件

1. NUDEの計算で、UO₂ならびにPuO₂の理論密度は、格子定数ならびに同位元素比より計算する。
2. 同位元素比は、Preliminary design(SN841-75-19)で示した値を用いる。
3. PuO₂/(PuO₂+UO₂)の値も、Preliminary designの値を用い、各ロット毎の変動

は考慮しない。

4. O/M比は, spec 1.96~2.00 の中間値 1.98 を用い, 各ロット毎の変動は考慮しない。(O/M = 1.98 ± 0.02 に対し, 理論密度は, 11.043 ± 0.013 である。)

RAPSCOJE PNC 6/7 THEO. DENSITY CAL. O/M=1.96

 * PU ENRICHMENT *

	W/O	A/O
PUO2/(PUO2+UO2)	30.0000	29.7588
UO2/(PUO2+UO2)	70.0000	70.2412

 * DENSITY (G/CM**3) *

	PUO2	UO2	PUO2-UO2
T.D. (100 O/O)	11.4432	10.8592	11.0293
EFFECTIVE DEN.	11.4432	10.8592	11.0293

 * ISOTOPIC COMPOSITION *

	W/O (INPUT)	A/O	* W/O *
U-234	0.0	0.0	0.0
U-235	60.0000	60.3047	37.0782
U-236	0.0	0.0	0.0
U-238	40.0000	39.6953	24.7188
PU-238	0.1000	0.1005	0.0265
PU-239	76.0000	76.0904	20.1587
PU-240	19.6000	19.7408	5.2519
PU-241	3.5000	3.4750	0.9284
PU-242	0.6000	0.5933	0.1591
AM-241	0.0	0.0	0.0
(PPM)	0.0		
NP-237	0.0	0.0	0.0
(PPM)	0.0		
O-16			11.6784

 * ATOMIC MASS *

PU	PUO2	PU/PUO2	
239.3363	270.6948	0.8842	
U	UO2	U/UO2	(PU+U)O2
236.2374	267.5959	0.8828	268.5181

 * ATOMIC NUMBER DENSITY * (N/CM**3)*10**24

U-234	0.0
U-235	0.104784E-01
U-236	0.0
U-238	0.689739E-02
PU-238	0.740133E-05
PU-239	0.560141E-02
PU-240	0.145323E-02
PU-241	0.255815E-03
PU-242	0.436724E-04
AM-241	0.0
NP-237	0.0
O-16	0.464853E-01

RAPSODIE PNC 6/7 THEO. DENSITY CAL. O/M=1.98

 * PU ENRICHMENT *

	W/O -----	A/O -----
PUO2/(PUO2+UO2)	30.0000	29.7590
UO2/(PUO2+UO2)	70.0000	70.2410

 * DENSITY (G/CM**3) *

	PUO2 -----	UO2 -----	PUO2-UO2 -----
T.D.(100 O/O)	11.4567	10.8722	11.0425
EFFECTIVE DEN.	11.4567	10.8722	11.0425

 * ISOTOPIC COMPOSITION *

	W/O (INPUT) -----	A/O -----	* W/O * -----
U-234	0.0	0.0	0.0
U-235	60.0000	60.3047	37.0339
U-236	0.0	0.0	0.0
U-238	40.0000	39.6953	24.6893
PU-238	0.1000	0.1005	0.0265
PU-239	76.0000	76.0904	20.1349
PU-240	19.8000	19.7408	5.2457
PU-241	3.5000	3.4750	0.9273
PU-242	0.6000	0.5933	0.1590
AM-241	0.0	0.0	0.0
(PPM)	0.0		
NP-237	0.0	0.0	0.0
(PPM)	0.0		
O-16			11.7835

 * ATOMIC MASS *

PU -----	PUO2 -----	PU/PUO2 -----	
239.3363	271.0149	0.8831	
U -----	UO2 -----	U/UO2 -----	(PU+U)O2 -----
236.2374	267.9158	0.8818	268.8379

 * ATOMIC NUMBER DENSITY * (N/CM**3)*10**24

U-234	0.0
U-235	0.104784E-01
U-236	0.0
U-238	0.689736E-02
PU-238	0.740139E-05
PU-239	0.560146E-02
PU-240	0.145324E-02
PU-241	0.255817E-03
PU-242	0.436728E-04
AM-241	0.0
NP-237	0.0
O-16	0.469800E-01

RAPSODIE PNC 6/7 THEO, DENSITY CAL. O/M=2.00

 * PU ENRICHMENT *

	W/O -----	A/O -----
PUO2/(PUO2+UO2)	30.0000	29.7593
UO2/(PUO2+UO2)	70.0000	70.2406

 * DENSITY (G/CM**3) *

	PUO2 -----	UO2 -----	PUO2-UO2 -----
T.D.(100 O/O)	11.4702	10.8852	11.0556
EFFECTIVE DEN.	11.4702	10.8852	11.0556

 * ISOTOPIC COMPOSITION *

	W/O (INPUT) -----	A/O -----	* W/O * -----
U-234	0.0	0.0	0.0
U-235	60.0000	60.3047	36.9897
U-236	0.0	0.0	0.0
U-238	40.0000	39.6953	24.6598
PU-238	0.1000	0.1005	0.0265
PU-239	76.0000	76.0904	20.1112
PU-240	19.8000	19.7408	5.2395
PU-241	3.5000	3.4750	0.9262
PU-242	0.6000	0.5933	0.1568
AM-241	0.0	0.0	0.0
(PPM)	0.0		
NP-237	0.0	0.0	0.0
(PPM)	0.0		
O-16			11.8884

 * ATOMIC MASS *

PU -----	PUO2 -----	PU/PUO2 -----	
239.3363	271.3347	0.8821	
U -----	UO2 -----	U/UO2 -----	(PU+U)O2 -----
236.2374	268.2358	0.8807	269.1577

 * ATOMIC NUMBER DENSITY * (N/CM**3)*10**24

U-234	0.0
U-235	0.104784E-01
U-236	0.0
U-238	0.689733E-02
PU-238	0.740147E-05
PU-239	0.560152E-02
PU-240	0.145325E-02
PU-241	0.255826E-03
PU-242	0.436733E-04
AM-241	0.0
NP-237	0.0
O-16	0.494748E-01