

AMIR-8照射キャプセルの設計

区分変更	
変更後資料番号	PNC TN9470 97-001
決裁年月日	平成 10 年 3 月 26 日

1996年11月



動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。については複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

AMIR-8照射キャプセルの設計

永田 貴子 小野瀬 庄二 丸山 忠司

要 旨

高速炉制御棒の長寿命化を達成するため、現在高温シュラウドを有するHeボンドシュラウド型吸収ピン及びNaボンドシュラウド型吸収ピンの開発が進められている。また、 B_4C に代わる新型中性子吸収材の開発では、炉外評価で特性向上の図られた材料について照射試験を行い、長寿命制御棒への適用可能性の評価が求められている。

制御棒材料照射用反射体（AMIR-8）照射試験では、上記に示した目的を達成するため、Naボンド型吸収ピン3タイプ、Heボンド型吸収ピン2タイプをキャプセルにて照射する。これらのキャプセル設計を行う上では、照射目的を達成するために燃焼度 50×10^{26} cap/m³、照射温度については最高1200℃等の照射条件を確保しつつキャプセルの健全性を確保することが求められる。これらの要求を満たすため、ギャップ幅、装荷位置及びガスプレナム容積を調整してキャプセル設計を実施した。その結果、目標達成燃焼度が、Heボンド型吸収ピンタイプのうちAMIR-10,11に継続照射を予定しているキャプセルについて制限されたが、他のキャプセルについては照射計画通り達成できることを確認し、最終的な設計値を確定した。

The Design of Irradiation Capsules for Absorber Material
Irradiation Rig-8

Takako Nagata*, Shoji Onose*, Tadashi Maruyama*

Abstract

In order to extend life of control rods for fast reactors, development of both helium-bonded and sodium-bonded absorber pins with shroud are now under investigation. Also, in development of advanced absorber materials which are alternative materials to B4C, the materials that exhibited better properties in out of pile experiments are needed to do irradiation tests to evaluate applicability as neutron absorber in long life control rods.

In irradiation tests of AMIR-8, capsules of two types of helium-bonded and three types of sodium-bonded absorber pins are to be irradiated. In designing these capsules, it is requested that the capsules must possess integrity during irradiation at burnup values of $50 \sim 200 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ at maximum irradiation temperature of 1200°C . In order to satisfy above requirements, the design of capsules was done by adjusting the gap size between absorber and cladding, the loading positions and the volume of plenums. The results of design study indicated that, although a target burnup was limited in some capsules, it was confirmed that the irradiation tests are successfully carried out in the other capsules to meet the object of irradiation tests, thereby numerical values in the design of capsules were able to fix.

* Material Monitoring Section, Fuels and Materials Division, Oarai Engineering Center, PNC.

目次

第1章 緒言	1
第2章 AMIR-8照射試験計画の概要	3
2-1 照射目的	3
2-1-1 Naボンドキャプセル	3
2-1-2 Heボンドキャプセル	4
2-1-3 ポーラスプラグ	5
2-2 照射試験結果の反映先	6
2-2-1 Naボンドキャプセル	6
2-2-2 Heボンドキャプセル	6
2-2-3 ポーラスプラグ	6
2-3 照射試験体の仕様・構造	6
2-3-1 反射体	6
2-3-2 コンパートメント・軸心管	7
2-3-3 照射キャプセル	7
(1) Naボンドキャプセル	7
(2) Heボンドキャプセル	10
2-4 目標照射条件	11
2-4-1 Naボンドキャプセル	12
2-4-2 Heボンドキャプセル	12
第3章 キャプセル設計	14
3-1 健全性評価	14
3-1-1 燃焼度予測	14
3-1-2 温度評価	15
3-1-3 プレナム体積	17
3-1-4 初期ギャップ	19
3-2 キャプセル仕様	21
3-2-1 キャプセル	21
(1) Naボンドキャプセル	21
(2) Heボンドキャプセル	23
3-2-2 照射条件	24
第4章 結言	26

表リスト

表 2-1-1. AMIR-8照射キャプセルの設計条件	27
表 2-1-2. B ₄ Cペレット仕様	28
表 3-1-1. 各燃焼度における実測値と計算値との関係	29
表 3-1-2. 各物質の熱伝導度	30
表 3-1-3. HEATING-5による温度計算結果	31
表 3-1-4. プレナム体積算出に伴って用いる各変数	32
表 3-1-5. プレナム体積の算出	33
表 3-1-6. プレナム長の比較	34
表 3-1-7. 残留ギャップ量の変化	35
表 3-2-1. AMIR-8照射キャプセルの設計値	36
表 3-2-2. ポーラスプラグ仕様, 照射条件	37
表 3-2-3. 設計照射条件	38

図リスト

図1-1.	制御棒の寿命制限因子と対策	39
図1-2.	リロケーション概念図	40
図3-1-1.	コンパートメント内配置図	41
図3-1-2.	リグ内冷却材軸方向温度分布	42
図3-1-3.	スエリングの燃焼度依存性	43
図3-2-1.	Aタイプキャプセル図 (Naボンド・シュラウド) Na半封入型	44
図3-2-2.	Bタイプキャプセル図 (Naボンド・シュラウド) Na封入型	45
図3-2-3.	Cタイプキャプセル図 (Naボンド・シュラウド) Na流通型	46
図3-2-4(a).	D-1-Aタイプキャプセル図 (Heボンド・シュラウド) 高温シュラウド (Nb-1Zrシュラウド) ...	47
図3-2-4(b).	D-1-Bタイプキャプセル図 (Heボンド・シュラウド) 高温シュラウド (SiC/アルミナ シュラウド) ...	48
図3-2-5(a).	D-2-Aタイプキャプセル図 (Heボンド・シュラウド) 高温シュラウド (Nb-1Zrシュラウド) ...	49
図3-2-5(b).	D-2-Bタイプキャプセル図 (Heボンド・シュラウド) 高温シュラウド (SiC/アルミナ シュラウド) ...	50
図3-2-6.	Eタイプキャプセル図 (Heボンド、2重管) 新型制御材	51
図3-2-7.	Fタイプキャプセル図 (Heボンド、2重管) 新型制御材	52

第1章 緒言

高速実験炉「常陽」MK-IIでのAMIR (Absorber Material Irradiation Rig) を用いた制御棒材料の照射試験は、吸収材料の照射挙動を評価する目的で、1984年4月に開始され、AMIR-1から-7まで照射試験を実施している。現時点においてAMIR-5までの照射後試験が実施され、AMIR-6および-7については照射継続中である。

AMIR-8照射計画については、1994年に「AMIR-8照射試験計画 (MMSメモ; 06 (MMS)46)」として確定した。その後の研究開発の進展に伴い、幾つかの変更点が生じたため、今回ここに変更後の概要をまとめて示し、更にこの変更後の計画に基づき実施したAMIR-8照射キャプセルの設計について述べる。

制御棒の寿命は B_4C ペレットのHe放出に伴う吸収ピンの内圧増加、 B_4C ペレットのスエリング (体積膨張) に伴う被覆管との機械的相互作用 (ACMI: Absorber Cladding Mechanical Interaction) および B_4C ペレットの核的寿命という、3つの代表的な因子によって決定される。本来制御棒の寿命は純粋に B_4C ペレットの核的寿命により決定されるのが理想であるが、実際には吸収ピン内圧やACMIが寿命制限因子となっているのが現状である。寿命制限因子とそれぞれの対策をまとめたものを図1-1に示す。図に示すように、長寿命化には大きく分けて3つの段階があり、現在のシールド型による最適寿命の確認が第1段階として実施されている。第2段階は図中においてステップ1として示されているもので、Heボンドにシュラウド管を併用し「もんじゅ」2サイクル化以上を目標としたHeボンドシュラウド型吸収ピンの開発が計画されている。さらに第3段階は図中ステップ2および3として示されているもので、ギャップを拡げボンド材にNaを用い「もんじゅ」3サイクル化以上を目標としたNaボンドシュラウド型吸収ピンの開発が計画されている。

各寿命制限因子に対する方策について従来得られている知見と今回の照射試験における着眼点を以下に示す。

吸収ピン内圧については、Heボンド型吸収ピンではHeガスを吸収ピン外へ放出するベント機構として、既に「常陽」MK-II制御棒においてダイビングベル型のベント機構の使用実績を有している。そこで、AMIR-8照射試験では図1-1においてステップ2および3に相当する、長期的な長寿命化を達成するのに必須となるNaボンド型吸収ピンのベント機

構として、ダイビングベル改良型（「常陽」MK-Ⅲに採用が予定されているNa導入管付き上部ベント型で、以下MK-Ⅲ確証型と記す。）及び上下ポーラスプラグ型について照射下でのHe放出機能の確認を行うものである。

ACMIについては、ペレットと被覆管とのギャップを拡大し、相互の接触を遅らせるのが最も有効であるが、このギャップの拡大はペレットの中心温度の上昇に加えて、ペレット破片のリロケーション（クラックしたペレット片が被覆管の内部で移動、再配置すること；図1-2）によるACMIの加速を引き起こす。ペレット中心温度の上昇については、ギャップ部を従来のHeガスから熱伝達の良いNaに置き換えるNaボンド型の採用により解決できる見通しがたっている。リロケーションの発生については、ペレットを薄肉管で包み込むシュラウド管の採用で抑制できる可能性がある。シュラウド管の使用温度を考慮した場合、Heボンド型では耐熱材の使用が、またはシュラウド温度を下げる目的からNaボンド型での使用が条件となる。

従って、制御棒の長寿命化を目指した場合に吸収材として B_4C ペレットを使用するならば、Heボンド型吸収ピンの場合はベント機構および高温シュラウドの採用、一方Naボンド型吸収ピンの場合はベント機構とシュラウド管の採用が必須であり、これらが照射下でどのような挙動を示すかを評価する必要がある。

また、 B_4C よりも熱伝導度や耐熱衝撃性、耐スエリング性に優れた新しい材料を開発することは、リロケーションやペレットの中心溶融を生じさせずにギャップを拡大することを可能にする。これらの新材料を採用することにより、Naボンドやシュラウド管なしで制御棒の長寿命化を達成する可能性がある。そこで、炉外において各新材料の特性評価試験より選定した材料について照射試験を行い、照射挙動を評価する。

AMIR-8ではNaボンド型、高温シュラウドおよび新型制御材の3タイプのキャプセルを目標燃焼度 $50 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ まで照射する予定である。なお、最終目標燃焼度については、「もんじゅ」2サイクル化以上達成に向けたHeボンド高温シュラウドについては $150 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ 、「もんじゅ」3サイクル達成のに向けたNaボンド型および新型制御材については $200 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ とし、AMIR-10・11への継続照射によって達成する見込となっている。

第2章 AMIR-8照射試験計画の概要

2-1 照射目的

制御棒長寿命化の方策として考えられている、Naボンドシュラウド型吸収ピンの開発ではベント機構及びシュラウド機能の確認と部材のNa反応挙動評価を、Heボンドシュラウド型ピンではシュラウド管が高温条件となるため高温照射でのシュラウド管の健全性を評価する。また、新型中性子吸収材の開発では、炉外評価にて特性向上の図られた材料について照射挙動評価を行う。

AMIR-8照射試験では、上記に示した目的を達成するため、Naボンド3タイプ、Heボンド2タイプの計14本のキャプセルにて照射を行う。今回照射試験を実施する各照射キャプセルに関して、以下にそれぞれ照射目的を示す。(表2-1-1：AMIR-8照射キャプセルの設計条件参照。)

2-1-1 Naボンドキャプセル

Naボンドキャプセルの主要な照射目的は B_4C ペレットと被覆管のギャップ幅拡大による寿命延長の可能性の確認として、ベント機能、シュラウドの機能・健全性及び部材(金属および B_4C ペレット)のNa反応性の評価である。

ベント型Naボンド吸収ピンを実機制御棒に採用する場合、ベント機構のタイプは上部のみにベント孔を配置した上部型、上下にベント孔を配置した上下型が考案されている。

上部型において、従来のダイビングベル型のベント機構を採用した場合にはAMIR-5の試験結果から、吸収ピン内外の温度差によりピン内のNaが蒸発し、Naボンドの機能を果たさなくなる可能性が示された。よって、上部ベント型吸収ピンの採用に当たってはNaの蒸発抑制、または蒸発した分のNaを補う等の機能を有した構造が必要となる。今回の照射試験ではNaが補充されるダイビングベルを改良したMK-Ⅲ確証型について炉内での成立性を確認する。

これに対し、上下型の場合は上下にベント孔を配し、Naの充填性および使用後のドレン性を狙った機構である。ベント孔には B_4C ペレット破片の流出を防ぐ目的でポラスプラグが付けられた構造となる。今回の照射試験では、ポラスプラグ上下ベ

ト機構において、Naボンドが保たれるか確認する。

Naボンドの採用によりギャップ幅の拡大が可能になるが、これによりリロケーションの発生を加速する可能性がある。シュラウド管の機能は、割れた B_4C ペレット破片の移動を拘束してリロケーションの発生を防ぎ、 B_4C ペレットと被覆管とのギャップを有効に活用するものである。今回の照射試験では、照射下Naボンド条件にてシュラウド管の機能及び健全性を確認する。

炉外試験の結果から、Na- B_4C ペレット-被覆管体系での化学反応（以下；Na腐食と記す。）により B_4C ペレットの溶出及び被覆管の脱炭とホウ素の浸入が確認されており、炉内照射下においてNaと部材（ B_4C ペレットと被覆管）とのNa腐食を評価する必要がある。また、Crコーティングが優れた耐Na腐食性を持つことが炉外試験で確認されており、Crコーティングについてもその効果と健全性を確認する必要がある。今回の照射試験では、シュラウド管の機能と部材のNa腐食挙動及びそれらに及ぼすNa流通の効果を調べる。

2-1-2 Heボンドキャプセル

Heボンドキャプセル照射の目的は高温照射におけるシュラウド管の機能及び健全性確認である。

(1) 高温シュラウド

「もんじゅ」制御棒を現仕様（Heボンド・密封型）のまま2サイクル以上を達成するためには、リロケーションの発生を抑制するためのシュラウド管の採用が必要である。緒言で述べたように、シュラウド管の照射温度はペレットと被覆管とのギャップ幅に依存する。「もんじゅ」制御棒での使用を想定した場合、シュラウド管温度は1サイクル寿命ギャップで約800℃、2サイクル寿命ギャップで約1100℃になる（出典：PNC ZJ1214 94-015 もんじゅ調整棒の長寿命化に関する検討（I）1994年6月）。シュラウド管の材質としては、 B_4C との炉外共存性評価の結果よりNb-1Zr合金、SiC繊維（ハイニカロン）および Al_2O_3 繊維（アルマックス）が選定された。しかし高温における照射挙動データ（健全性）は全くないのが現状である。よって、選定されたこれらの材料について高温条件におけるシュラウド管の照射挙動を調べ、「もんじゅ」への高温シュラウド管の適用性を検討する。

(2) 新型制御材

高速炉制御棒の中性子吸収材としては、一般に B_4C ペレットが用いられている。しかしながら、 B_4C ペレットは非常に硬く、照射中の熱伝導度の急激な低下に伴う熱応力の発生や靱性が低い等の理由により使用中にクラックを生じる。さらに、ペレット破片のリロケーションやスエリングによりACMIが発生し、寿命が制限される。そのため、熱伝導度・靱性に優れた新材料を開発することにより、Naボンドやシュラウド管を用いない簡単な構造の長寿命制御棒が考えられている。これまでに、 B_4C /Cuサーメットや B_4C /BN、 B_4C /SiC等の複合材料の試作研究を行い、 B_4C に比べ熱・機械的性質ともに優れた特性を有する結果が示された。そこで、これらの材料のうち B_4C /BN、 B_4C /SiCに関してHeボンド条件で照射試験を行い、基礎的な照射物性データを取得する。また、従来型の B_4C ペレットに関しても、製法の違いが照射挙動に与える影響を調べることを目的に、Mg入り B_4C ペレットの照射試験を行う。

2-1-3 ポーラスプラグ

Naボンド型吸収ピンのベント機構に上下ベント型を採用する場合、ベント孔からHeガスおよびNaを通過させるとともに、微細な B_4C ペレット破片の流出防止を図る必要がある。これらの機能を持つ濾過材料には、SUS316の繊維または粉末を焼結したポーラスプラグが考えられている。これら材料の照射下での健全性および通過性能の変化を確認する目的で、Naボンドピンで照射を行う。照射は腐食挙動に及ぼすNaの流通効果を併せて確認するため、封入型、流通型の2種類のNaボンド型キャプセルにて行う。

2-2 照射試験結果の反映先

各照射試験結果の反映先は次の通りである。

2-2-1 Naボンドキャプセル

「もんじゅ」3サイクル以上、大型炉1サイクル以上使用可能な長寿命制御棒の設計に反映する。また、「常陽」MK-Ⅲ制御棒で採用予定のMK-Ⅲ確証型Naボンド・シュラウド型吸収ピンの適用性評価に資する。

2-2-2 Heボンドキャプセル

(1) 高温シュラウド

高温照射でのシュラウドの機能及び健全性確認により、「もんじゅ」制御棒2サイクル以上使用の適用性評価に資する。

(2) 新型制御材

照射挙動に関する基礎データを取得し、実用化の可能性を調べる。さらに、この結果を今後の新型制御材開発に反映する。

2-2-3 ポーラスプラグ

照射挙動に関する基礎データを取得し、実用化の可能性を調べる。さらに、この結果を今後のポーラスプラグの開発に反映する。

2-3 照射試験体の仕様・構造

AMIR-8は、反射体・コンパートメント・軸心管・照射キャプセル等から構成されている。AMIR-8の基本構造は従来の制御棒材料照射用反射体と同様で変更はない。

2-3-1 反射体

本試験に使用する反射体は、炉心燃料集合体と同様の外径形状を有し、ハンドリングヘッド・ラップ管・エントランスノズル・コンパートメント・軸心管・照射キャプセル等から構成されている。

2-3-2 コンパートメント・軸心管

反射体内にコンパートメントは6本、軸心管1本が配置され、それぞれ上下に照射キャプセルが1本ずつ装荷される。

2-3-3 照射キャプセル

表2-1-1に示されるように14本のキャプセルを照射する。試験キャプセルタイプはNaボンドとHeボンドに分類され、さらにNaボンドキャプセルはベント型の半封入型（2本）、流通型（1本）、及び密封型（3本）の封入型に区別される。一方、Heボンドキャプセルは何れも密封型で高温シュラウド（4本）および新型制御材（4本）に区別される。

(1)Naボンドキャプセル

AMIR-8照射試験では、Heガスをキャプセル外に放出するベント型とキャプセル内に溜める密封型の2種類のキャプセルを照射する。ベント型ではベント機構がそれぞれ異なり、Naがほぼ停留する半封入型とNaが流通する流通型である。密封型はHeガスをキャプセル内のプレナム部にためる構造で、Naは封入したまま照射する。キャプセル管内面並び一部のシュラウド管の内外面にはCrコーティングが施される。

1) 半封入型

MK-Ⅲ確証型は上部のみベント機構を有することから、キャプセル形状は半封入型と特徴づけることができる。

半封入型のベント機構は、ダイビングベル型を改良してベント孔を二重にしたもので、減少した分のNaが補充される構造としたものである。キャプセル内へのNaの充填は、炉内装荷時に自然充填される。

「常陽」MK-Ⅲではこのタイプの制御棒を採用する予定であり、実機への採用に先立ち、機能確認のための照射を行うものである。各寸法およびペレットの仕様についてはMK-Ⅲ仕様とする。

①B₄Cペレット

¹⁰B濃縮度についてはいずれも90at.%とする、ペレット密度は90 %T.D.とする。

②シュラウド

肉厚0.1mmでスリット無しの構造とし、材質はPNC316とする。内外面にCrコーティングを厚さ約20μm施す。

③初期ギャップ

直径ギャップで約2.0mmを目標とする。

④キャプセル管

材質はPNC316鋼（20%CW）とし、内面にCrコーティングを厚さ約20μm施す。

2) 封入型

キャプセルはベント機構を設けず密封構造とし、Naは封入されたままで、Heはガスプレナム部に溜める構造とする。

①B₄Cペレット

¹⁰B濃縮度は短期間で目標燃焼度を達成するために全て90at.%とする。ペレット密度については、「もんじゅ」仕様の95%T.D.とする。

②シュラウド

肉厚0.1mmでスリット無しの構造とする。シュラウドの材質はPNCFMS鋼（フェライトマルテンサイト鋼）とする。また、このキャプセルのシュラウドにはNa腐食に対するコーティングの効果を調べるため、Crコーティングを施すものと施さないものの2種類を用いる。

③ポーラスプラグ

HeやNaの透過性を考慮し、かつペレットの割れに伴い発生するB₄C粒を吸収ピン外に流出させないための機能を持たせる。材質としてはNaとの共存性を考慮しSUS316L鋼を用いることとする。ポーラスプラグは繊維焼結型と粉末焼結型の2種類とする。

④ディスク試料

被覆管材料のNa腐食挙動を調べるため、PNC316（20%CW）及びPNC-FMS

(フェライトマルテンサイト鋼) のディスク試料をペレット端面に配置する。

⑤初期ギャップ

シュラウドの効果を見るために、目標燃焼度達成後もギャップが閉塞しないようにする。また、ギャップ部のNaの流動性を考慮し、初期ギャップは直径で約2.0mmを目標とする。

$$\text{※ (初期ギャップ)} = (\text{キャプセル管内径}) - (\text{シュラウド管外径})$$

⑥キャプセル管

材質は実機制御棒で用いられているPNC316鋼 (20%CW) とし、全て内面にCrコーティングを厚さ約20 μ m施す。

3) 流通型

上下にポーラスプラグを取り付け、下部からNaが充填され上部からHeが放出される構造としたものである。今回の照射ではNaは照射前に充填するが、照射中は炉内のNaが流通する構造となる。流通型と封入型のNa腐食挙動を比較することで、部材のNa腐食に及ぼすNa流通の効果を調べる。

①B₄Cペレット

¹⁰B濃縮度は全て90at.%とする。ペレット密度については、「もんじゅ」仕様の95%T.D.とする。

②シュラウド

肉厚0.1mmでスリット無しの構造とする。材質はPNC-FMS (フェライトマルテンサイト鋼) とする。Crコーティングは施さない。

③ポーラスプラグ

封入型に準ずる。

④ディスク試料

封入型に準ずる。

⑤初期ギャップ

シュラウドの効果を見るために、目標燃焼度達成後もギャップが閉塞しないようにする。また、ギャップ部のHeの流動性を考慮し、初期ギャップは直径で厚さ約2.0mmを目標とする。

※ (初期ギャップ) = (キャプセル管内径) - (シュラウド管外径)

⑥キャプセル管

材質は実機制御棒で用いられているPNC316鋼 (20%CW) とし、内面にCrコーティングを厚さ約20 μ m施す。

(2)Heボンドキャプセル

1) 高温シュラウド

「もんじゅ」制御棒への高温シュラウド適用のためのバックアップ試験であり、ペレットの寸法、燃焼速度およびシュラウドの照射温度等について「もんじゅ」調整棒に合わせた試験とする。

照射キャプセルは、Heガスをキャプセル内のプレナム部にためる密封型とし、2種類の材質と2レベルの目標燃焼度の4本で構成される。

①B₄Cペレット

¹⁰B濃縮度は「もんじゅ」39wt%であるが、短期間で目標燃焼度を達成し、かつ高温で照射するためにAMIR-8ではいずれも90at.%とする。ペレット密度は「もんじゅ」仕様に合わせて95%T.D.とする。

②シュラウド

肉厚0.2～0.3mmでスリット無しの構造とする。材質はNb-1Zr合金、SiC繊維 (ハニカロン) およびAl₂O₃繊維 (アルマックス) という耐熱材料である。

③初期ギャップ

目標燃焼度においてACMIが生じないだけのギャップを確保しながら、シュラウド温度が800℃および1100℃となるギャップ幅を目標とする。

④キャプセル管

材質は実機制御棒で用いられているPNC316鋼 (20%CW) とする。

2) 新型制御材

照射キャプセルは、Heガスをキャプセル内のプレナム部にためる密封型とし、安全性を考慮して二重管構造とする。キャプセルは材質が2種類、目標燃焼度が2レベルの4本から構成される。

①ペレット材質

新型制御材としてはMg還元 B_4C （電気化学製とコジェマ製の2種）、 B_4C/BN および B_4C/SiC の4種類とし、比較材として従来型 B_4C も装荷する（表2-1-2）。

Mg入り B_4C は、いわゆるテルミット法（Mg還元法）により製造したMg含有量の多い原料粉末を用いて製作した B_4C ペレットである。この材料はフランスで使用しているものと同じ製法であり、比較的細かな割れが生じにくいとされる特性を持つ。

B_4C/SiC および B_4C/BN の複合材については、熱伝導度および耐熱衝撃性が B_4C に比べて優れている。特に B_4C/BN 複合材は B_4C に比べて軟らかく、またスエリングが低い可能性があり照射データが注目される。

②ペレット仕様

短期間で目標燃焼度を達成するために B_4C の ^{10}B 濃縮度は90at%とする。ただし、コジェマ製Mg入り B_4C については原料粉の関係で47.8wt%を用いた。ペレットと円盤状試料をそれぞれ1枚配置する。

③初期ギャップ

目標燃焼度において内側キャプセル管と外側キャプセル管に接触が生じないだけのギャップを確保しながら、ペレット中心温度が1200℃となるギャップ幅を目標とする。

④キャプセル管

材質は内側管、外側管共にPNC316鋼（20%CW）とする。

2-4 目標照射条件

AMIR-8は「常陽」MK-II炉心6D6孔において照射を行う。照射期間は31～33サイクル（約170EFPD）とする。

Naボンドキャプセルについては6本照射する。ベント機構の機能確認（キャプセル内のNa量等の確認）及びNaボンドピンの低燃焼度挙動を調べるため4本は33サイクルで取り出す。そして、2キャプセルについては「もんじゅ」および実証炉への適用性を調べるために、AMIR-10,11にて高燃焼度まで継続照射を行う。

Heボンドキャプセルについては、高温シュラウドおよび新型制御材はそれぞれ4本照射する。いずれも2本を基礎データ取得のために33サイクル終了後に取り出す。残りキャプセルについては、高温シュラウドは「もんじゅ」2サイクル以上への適用性を調べるためにAMIR-10、新型制御材はAMIR-10,11にて高燃焼度まで継続照射を行う。

2-4-1 Naボンドキャプセル

①燃焼度

早期にベント機構の機能確認および基礎データの取得のため一部キャプセルについては燃焼度 50×10^{26} cap/m³程度で取り出すこととする。また、残りのキャプセルについては、「もんじゅ」3サイクル以上の使用に相当する燃焼度 200×10^{26} cap/m³を目標とする。

②照射温度

Naボンドピンを「常陽」あるいは「もんじゅ」で使用した場合の被覆管およびシュラウド（ペレット表面）温度を計算し、最も条件の厳しい位置での温度をもって目標とする。

2-4-2 Heボンドキャプセル

(1) 高温シュラウド

①燃焼度

「もんじゅ」でシュラウドを採用した場合に、ペレットのスエリングにより生じるシュラウドの歪み速度を模擬する。このため、「もんじゅ」でのB₄Cの燃焼速度に合わせた照射とする。1サイクル使用に相当する燃焼度 50×10^{26} cap/m³および「もんじゅ」2サイクル以上に相当する燃焼度 150×10^{26} cap/m³を目標とする。

②照射温度

「もんじゅ」2サイクルでの使用に合わせたシュラウド温度1100℃を目標とする。

(2) 新型制御材

① 燃焼度

同様の仕様を設定したキャプセルを2レベル設定し、基礎データの取得のためまず燃焼度 50×10^{26} cap/m³で取り出す。残りの1組については「もんじゅ」2サイクル以上に相当する燃焼度 200×10^{26} cap/m³を目標とする。

② 照射温度

実機での使用温度を考え、内側キャプセル管内面温度で800℃程度、ペレット中心温度で1200℃程度とする。

第3章 キャプセル設計

第2章で示した「AMIR-8照射試験計画」に基づき、照射目的の達成とキャプセルの健全性を確保した設計を行った。詳細は以下に示すとおりである。

3-1 健全性評価

3-1-1 燃焼度予測

従来、AMIR照射試験に先立ってMAGIコード（「常陽」照射用炉心の炉心特性総合評価システム）による燃焼度予測計算を行っている。しかしこれまでの照射後試験結果から実測燃焼度は全般的にMAGI計算燃焼度より低い値を示す傾向が判明した（MMSメモ：05(MMS)41）。よって、補正係数（=実測値/MAGI計算値；0.756）を掛けてキャプセル設計を行うことにしたが、実測値とMAGI計算値との差にバラツキがあるためキャプセル温度が有為に高くなる可能性がある。この問題を解決するために、補正係数の検討および改訂を行った。

(1) 検討方法

補正係数のバラツキは低燃焼度（ $< 100 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ ）で比較的大きい（0.5～1.2程度）。低燃焼度領域では測定に起因する誤差が大きくなると考えられ、高燃焼度データに限ることで従来の補正係数0.756はさらに信頼できる値に見直すことが可能である。そこで、バラツキの小さい高燃焼度での補正係数を評価し、可能な限り試料温度の信頼性を向上させることにした。

(2) 結果

燃焼度の実測値と計算値（参考資料：MMSメモ 05(MMS)41）との相関を求めた値（表3-1-1参照）を用いることにより99%信頼幅上限値を求め、安全側を考慮した結果補正係数 k_0 は以下の値となった。

$$(\text{実測値}) = k_0 \times (\text{MAGI計算値}) \quad k_0 = 0.80$$

この値を用いて燃焼度および発熱量の計算を行い、キャプセル設計に反映させた。

3-1-2 温度評価

「常陽」定格運転第31～33サイクルまで照射するAMIR-8のNaボンドキャプセル及びHeボンドキャプセルについて、ペレット、シュラウドおよびキャプセルの各照射温度を知るためにHEATING-5（温度解析コード）を用いた温度計算を行い、得られた結果からギャップ幅の設計を行った。

計算条件としては、以下に示すものを用いた。

(1)各評価因子

①発熱量 (W/m³)

B₄Cペレットの発熱量については、ペレットの¹⁰B原子数密度よりMAGIで求めた燃焼度（図3-1-1）を基に、下式から算出したものを用いている。MAGIの発熱量については、これまでのAMIRの実測燃焼度と計算値の関係から現実ベースの温度評価は（計算値）×0.8で行うが（MMSメモ：07(MMS)74）、安全性の観点からMK-Ⅲ移行炉心での核特性の不確かさを考慮して補正無しのケースについても評価した。

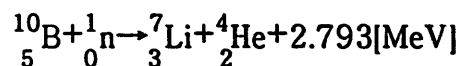
また、SUSおよびNaの発熱量は、技術課メモ（技-5-103）「MK-Ⅱ炉心の第5列、6列のγ発熱密度」より引用した。

B₄Cペレット発熱量 (W/m³)

$$= \text{燃焼度 (cap/m}^3) / (\text{EFPD} \times 24\text{h} \times 3600\text{s}) \times {}^{10}\text{B発熱量}Q^*$$

*¹⁰B発熱量Q

¹⁰Bの1capture当たりの発熱量は、



1eV=1.6×10⁻¹⁹[J]であるから、

$$2.797 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} = 4.47 \times 10^{-19} = 4.47 \times 10^{-13} [\text{W} \cdot \text{s/cap}]$$

②境界温度

従来のAMIR照射後試験結果を調べた結果、集合体冷却材の入口温度は370℃であるが、出口温度は480℃に上昇しているため、境界温度（冷却材とキャプセル外表面の界面温度）はコンパートメント軸方向において温度上昇を考慮する必要がある。よって境界温度は以下に示す式により算出した値（照射課メモ：照-(7)-243）を用いた。

図3-1-2に、設定したリグ内の冷却材軸方向温度分布を示す。

補正するための評価式は、上記のモデルを用いることにより

$$\text{冷却材温度 } T_{Na} = 370^\circ\text{C} + 0.786 \times \ell$$

（ ℓ ：MAGIノード下端から軸方向任意の位置までの距離 [cm]）

この概略式から求めた境界温度に従い、AMIR-8の温度評価を実施した。

③熱伝導度（W/m・K）

各物質の熱伝導率は表3-1-2に示す。Nb-1ZrについてはNbの熱伝導率を用いた。

④輻射熱伝達率（W/m²・K）

輻射熱伝達率は下式により表される。

$$q = F\delta(T_i^4 - T_j^4) \frac{1}{T_i - T_j}$$

q：熱伝達率

F：形状係数（平行平板を仮定）

δ ：ステファン・ボルツマン定数

$$5.675 \times 10^{-8} [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$$

ここで、

$$F\delta = 5.675 \times 10^{-12} / \left(\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1 \right)$$

e_1, e_2 ：輻射率

SUSの輻射率；0.3

B₄Cの輻射率；0.85 （照射課メモ：照-(6)-071）

※今回、 Al_2O_3 、Nb、CrについてはSUSと同じ輻射率を用い、SiCは B_4C と同じ輻射率を用いた。

(2) 計算結果および評価

以上の解析条件に基づき、全てのキャプセルについてそれぞれHEATING-5を用いて解析を行った。温度計算の過程では、シュラウド内表面温度が補正無しの場合で目標上限の $+50^\circ\text{C}$ 超えないことを目標とした。

表3-1-3に結果を示すが、補正係数0.8を掛けた現実ベースの場合および安全を考慮して補正しない場合の解析結果を合わせて示す。

目標温度と設計値との関係は、シュラウド内表面温度に注目すると、Naボンドキャプセルについては補正の有無はあまり関係なく、両者ともにやや高めという結果が得られたが、当初の目標範囲にほぼ含まれる。Heボンドキャプセルのうち高温シュラウドについては、補正を行わない場合に目標照射温度となり、補正を行った場合は 150°C 程度低めとなった。また、新型制御材の内側管については補正の有無いづれの条件でもほぼ目標照射温度の範囲内であった。 B_4C ペレット中心温度については、Naボンド及び高温シュラウドではほぼ目標値であったが、新型制御材では補正無しの場合約 200°C 高くなった。同タイプのキャプセルで計算温度が異なるのは、キャプセル毎で燃焼度が異なるのと、被覆管の寸法が固定されているため燃焼度（発熱量）の違いがそのまま反映されるためである。

3-1-3 プレナム体積

(1)目的

密封型キャプセルの設計を行う上で、ペレットからの放出Heによる内圧増加によってキャプセルが破損することのないような安全性を考慮したプレナム体積の決定が必要となる。また、今回のAMIR-8照射試験において、特に新型制御材についてはどの程度He放出が生じるかを調査する目的もあり、キャプセルの健全性を保ちつつ照射試験を行うために必要なプレナム体積を評価し、キャプセル設計を行う。

(2)算出方法

各キャプセルの目標燃焼度に基づき、それぞれのHe放出量を計算する（照射課メモ：照-(3)-587）。なお、ここでB₄CペレットからのHe放出率は100%、プレナム部の温度は500℃（=273+500=773K）とする。

$$V_{\text{He}} = V'_{\text{He}} \times 22.4 \times 10^3 \times 773 / 273 \times 1.0$$

$$V'_{\text{He}} = 200 \times 10^{20} \times V_p / (6.023 \times 10^{23})$$

つぎに、キャプセル全長からプレナム長さを未知数として条件式をたてる。

$$D_m = (D_o + D_i) / 2$$

$$P = V_{\text{He}} / V_{pl}$$

$$\sigma_{\theta} = P \times D_m / 2 / t$$

以上から、安全係数0.7を考慮して

$$S_m \times 0.7 \geq \sigma_{\theta}$$

なお、上記の条件式において各変数は表3-1-4に示す通りである。

(3)結果

上述の条件式を用いて、PNC316 ST材のHoop応力限界値 S_m は $10.4 \times 10^6 \text{ kg/mm}^2$ （ $1.02 \times 10^2 \text{ MPa}$ ）と与えられることからプレナム体積の算出を行う。得られた結果を表3-1-5に示す。これらの結果をもとに、キャプセルの設計では安全を考慮し余裕を持たせたプレナム寸法（表3-1-6）を確認した。

3-1-4 初期ギャップ

B₄Cペレットのスエリングに伴うACMIによりキャプセル損傷が心配される。そこで、B₄Cペレットのスエリングを考慮したペレットとキャプセル管のギャップ幅を設ける必要がある。

なお、既に述べたとおり、ギャップは以下の式で示されるものとする。なお、新型制御材については内側キャプセル管をシュラウド管とみなす。

$$(\text{ギャップ}) = (\text{キャプセル管内径}) - (\text{シュラウド管外径})$$

(1)設定方法

ACMIを考える場合、ペレットのスエリングによる外径増加が最も主要な要因となる。そこで従来得られている照射後試験結果から、リロケーションは照射初期に生じ、ペレットとシュラウド間のギャップは無いものとし、シュラウド内径=ペレット外径と考慮してB₄Cペレットのスエリング式より外径増加量を計算後、照射末期におけるギャップ幅を評価し、初期ギャップを設定した。

海外データに依ればB₄Cのスエリングは5%/10²⁸cap/m³と報告されているが、実測燃焼度に基づく評価に依れば50×10²⁶cap/m³までは5%/10²⁸cap/m³、その後150×10²⁶cap/m³までは3%/10²⁸cap/m³となることがわかった(図3-1-3)。また、実測値全体を包絡するものとしてはほぼ4%/10²⁸cap/m³とみなすことができる。しかしここでは保守側を考慮し、スエリング速度としては5%/10²⁸cap/m³を採用し評価を行う。これらから、用いたスエリング式は、

$$Y = X + X \times \frac{0.05}{100 \times 10^{26}} \times a$$

ここで、Y; 照射後シュラウド内径推定値 (mm)

X; シュラウド内径 (mm)

a; 目標燃焼度 (cap/m³)

とする。

第2項の

$$\frac{0.05}{100 \times 10^{26} (\text{cap}/\text{m}^3)}$$

は、燃焼度 $100 \times 10^{26} \text{cap}/\text{m}^3$ あたり、5.0%のスエリングが起こるとして構築したものである。

(2)結果

上述の評価式を用いて得られた値を表3-1-7に示す。

この結果、Naボンド及び高温シュラウドについては目標燃焼度達成時においてペレットとキャプセル管にギャップが確保されたが、新型制御材では目標の $200 \times 10^{26} \text{cap}/\text{m}^3$ でACMIが生じる結果となった。このため、ギャップが確保できる $150 \times 10^{26} \text{cap}/\text{m}^3$ に目標燃焼度を変更する必要があると判明した。

3-2 キャプセル仕様

3-1に示した健全性評価を行った結果得られた最終的なキャプセル設計仕様について示す。

キャプセル配置（図3-1-1）及びキャプセルNo.に関しては表3-2-1に示すように対応している。各照射キャプセルの構造を図3-2-1～3-2-7に示す。

尚、キャプセル毎で冷却材温度に違いがないかを調べるために、全ての照射キャプセルの同一位置にオフライン温度モニタとしてTEDを装荷する。

3-2-1 キャプセル

(1)Naボンドキャプセル

1)半封入型

①シュラウド

シュラウド管の材質はPNCFMS（フェライト鋼）とし、寸法は $12.99^{\text{od}} \times 12.71^{\text{id}} \times 0.14^{\text{t}}$ mmとする。内側および外側にCrコーティング（厚さ $20 \mu\text{m}$ ）を施すことにより、最終的に 0.14mm の肉厚とする。

②初期ギャップ

ペレットと被覆管の直径ギャップは 1.87mm とする。この値は、照射後もキャプセルの健全性を保つために十分な値である。

③キャプセル管

材質はPNC316（20%CW）で、寸法は $16.90^{\text{od}} \times 14.86^{\text{id}} \times 1.02^{\text{t}}$ mmとし、内面にCrコーティングを施す。

2)封入型

①シュラウド管

材質はPNC316で、寸法は $12.95^{\text{od}} \times 12.75^{\text{id}} \times 0.10^{\text{t}}$ mmとした。内側および外側にCrコーティングを厚さ $20 \mu\text{m}$ 施すことにより、最終的に 0.14mm の肉厚となる。

②初期ギャップ

ペレットとキャプセル管の直径ギャップは1.62mmとした。この値は、照射後もキャプセルの健全性を保つために十分な値である。

③キャプセル管

キャプセル管の材質はPNC316 (20%CW) で、寸法は $20.00^{\text{od}} \times 17.96^{\text{id}} \times 1.02^{\text{t}}$ mmとし、内面にCrコーティングを厚さ $20 \mu\text{m}$ 施す。

④ポーラスプラグ

繊維焼結タイプのポーラスプラグを上、粉末焼結タイプのポーラスプラグを下に装荷する。繊維焼結タイプについては、(a)繊維と金網を焼結した2層構造、(b)繊維単体という2種類を重ねて2重構造として用いる。

ポーラスプラグの仕様については表3-2-2に示す。

3) 流通型

①シュラウド管

シュラウド管の材質はPNCFMS (フェライト鋼) を用い、寸法は $12.95^{\text{od}} \times 12.75^{\text{id}} \times 0.10^{\text{t}}$ mmとする。Crコーティングは施さない。

②初期ギャップ

ペレットと被覆管の直径ギャップは1.91mmとする。この値は、照射後もキャプセルの健全性を保つために十分な値である。

③キャプセル管

キャプセル管の材質はPNC316 (20%CW) とし、 $16.90^{\text{od}} \times 14.86^{\text{id}} \times 1.02^{\text{t}}$ mmとし、内面にCrコーティングを施す。

④ポーラスプラグ

繊維焼結タイプのポーラスプラグを上下に装荷する。この、繊維焼結タイプについては、(a)繊維と金網を焼結した2層構造、(b)繊維単体という2種類を重ねて2重構造として用いる。

ポーラスプラグの仕様については表3-2-2に示す。

(2)Heボンドキャプセル

1) 高温シュラウド

①シュラウド

材質としては、Nb-1Zr、SiCおよびアルミナを採用する。Nb-1Zrについては単独で用い、SiCとアルミナについては1つのキャプセルに2種類とも装荷する。この時、上にSiCを装荷し下にアルミナを装荷する。シュラウド寸法は、 $12.90^{\text{od}} \times 12.50^{\text{id}} \times 0.30^{\text{t}}$ mmとする。

②初期ギャップ

ペレットとキャプセル管の直径ギャップは1.87mmとする。この値は、照射後もキャプセルの健全性を保つために十分な値である。

③キャプセル管

材質はPNC316 (20%CW) を用い、寸法は $16.90 \times 14.86 \times 1.02^{\text{t}}$ mmとする。内面にCrコーティング (20 μ m) を施す。

2) 新型制御材

①初期ギャップ

新型制御材を用いるものについては、これら材料の照射挙動が十分把握されてないため、安全性を考慮して2重管構造とした。直径ギャップは、新型制御材のスエリングが B_4C ペレット同じものとして設計し、1.10mmとした。

②キャプセル管

材質はPNC316 (20%CW) とし、寸法は外側管を $21.00^{\text{od}} \times 18.00^{\text{id}} \times 1.50^{\text{t}}$ mm、内側管を $16.90^{\text{od}} \times 12.90^{\text{id}} \times 2.00^{\text{t}}$ mmとする。

3-2-2 照射条件

3-1に示した健全性評価の結果を受けて、照射条件を確定した（表3-2-3参照）。燃焼度については、 $50 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ を目標としたが、MAGIコードを用いた「常陽」6D6孔照射における燃焼度計算によれば、Naボンドにおいて $41.8 \sim 60.8 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ 、He高温シュラウドにおいて $47.0 \sim 48.6 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ 、新型制御材において $37.6 \sim 47.4 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ という範囲の値をとることが分かった。このような燃焼度に幅が生じてしまうのは、リグ内の中性子束密度が軸方向及び経方向に分布し、更に B_4C 等の吸収材をリグ内に配置した場合、それぞれが中性子束密度に影響し合うため、全てのキャプセル燃焼度を目標値にすることは困難なためである。従って、照射温度についても、キャプセルタイプ毎で部材寸法が同じであるため燃焼度の違いが温度に反映され、同タイプのキャプセル間で温度に違いがでる。設計では、個々のキャプセルで燃焼度と照射温度の双方を目標値に合わせるため、MAGIとHEATING-5を繰り返し計算し、当初の目的を達成するために最適な条件を導き出したものである。

(1)Naボンドキャプセル

①燃焼度

AMIR-8におけるNaボンド各キャプセルの燃焼度は、 $41.8 \sim 60.8 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ となった。目標燃焼度の $50 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ に対して増減となったため、継続照射しないキャプセルを優先して高めの燃焼度となる配置とした。

②照射温度

シュラウド内面温度で $487 \sim 532^\circ\text{C}$ 、ペレット中心温度で $779 \sim 996^\circ\text{C}$ となった。

(2)Heボンドキャプセル

1) 高温シュラウド

①燃焼度

AMIR-8での高温シュラウドキャプセルの燃焼度は、 $47.0 \sim 48.6 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ となった。目標燃焼度である $50 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ をほぼ達成した。

②照射温度

シュラウド内面温度で1051～1120℃、ペレット中心温度で1219～1274℃となった。

2) 新型制御材

① 燃焼度

AMIR-8での新型制御材キャプセルの燃焼度は、 $37.6\sim 47.4\times 10^{26}\text{cap/m}^3$ となった。目標燃焼度 $50\times 10^{26}\text{cap/m}^3$ に対し、低めとなったキャプセルは継続照射に割当てた。

② 照射温度

内側キャプセル被覆管の内面温度752～840℃、ペレット中心温度で1208～1364℃となった。

第4章 結言

AMIR-8照射計画に、照射温度・部材材質・照射期間等の変更が生じたため、その変更点を受けて本報告書中で最終的な計画を示した。この内容に基づいて、照射目的を達成するためのキャプセル設計を健全性を確保しつつ実施した。最終的な照射条件は、次のように確定した。

燃焼度については、AMIR-8照射では $50 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ を当初考えていたが、MAGIを用いた燃焼度計算によれば、Naボンドにおいて $41.8 \sim 60.8 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ 、高温シュラウドにおいて $47.0 \sim 48.6 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ 、新型制御材において $37.6 \sim 47.4 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ という範囲の値となり、ほぼ目標の燃焼度を達成可能な設計となった（図3-1-1参照）。

また、AMIR-8に引き続き照射するキャプセルの最終目標燃焼度については、新型制御材がACMIによる制限より $200 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ から $150 \times 10^{26} \text{cap/m}^3$ に変更となった。新型制御材の照射挙動を評価する上では十分な値であり、問題は無い。

照射温度については、Naボンドのシュラウド管及び B_4C ペレットはそれぞれ 450°C 、 900°C を目標としたが、HEATING-5を用いた温度計算では $476 \sim 516^\circ\text{C}$ 、 $711 \sim 892^\circ\text{C}$ とペレットで若干低いものもあるが、ほぼ目標温度で設計できた。

これらをふまえて設計したAMIR-8照射キャプセルの照射条件が表3-2-3に相当する。この結果、AMIR-8はキャプセルの健全性を確保しつつ照射目的が達成可能な設計となった。

表 2-1-1 AMIR-8 照射キャプセルの設計条件

キャプセルタイプ	照射目的	目標燃焼度 ($\times 10^{14}$ cap/m ²)		目標照射温度 ^{*1} (°C)		継続照射	ペレット			シュラウド管			キャプセル管				目標ギャップ ^{*2} mm	備考			
		AMIR-8	最終到達	シュラウド管	ペレット		材質	濃縮度 %B at. %	密度 %T.D.	材質	肉厚 mm	コーティング	材質	外径 mm	内径 mm	肉厚 mm			コーティング		
																				内側管	内側管
Naメソッド シュラウド	半封入	・MK-III型の検証	50	50	450	900	—	B.C	90	90	PNC316	0.14	Cr	PNC316	20.00	17.96	1.02	Cr	>1.6		
			50	200	450	900	AMIR-10, 11	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	
	封入	・シュラウド機能の確認 ・Na腐食挙動(PNC316, PNC-FMS) ・ネオプレンの照射挙動評価 ・Na流通効果	50	50	450	900	—	"	"	95	PNC-FMS	0.14	"	PNC316	16.90	14.86	"	"	"	"	ネオプレン
			50	200	450	900	AMIR-10, 11	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	ネオプレン、フィス試験
			50	50	450	900	—	"	"	"	"	0.10	無	"	"	"	"	"	"	"	ネオプレン、フィス試験
	流通	50	50	450	900	—	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	ネオプレン、フィス試験	
Heメソッド シュラウド	高温シュラウド	・シュラウド機能の確認 ・高温下での共存性確認(B.C-シュラウド被覆管)	50	50	1100	1350	—	"	"	"	Nb-Zr	0.20	"	"	"	14.90	1.00	無	"		
			50	150	1100	1350	AMIR-10	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	
			50	50	1100	1350	—	"	"	"	SiC 7%Zr	0.30 0.30	"	"	"	"	"	"	"	"	
			50	150	1100	1350	AMIR-10	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	
Heメソッド 2重キャプセル	新型制御材	・基本照射特性の把握(スリッパ、割れ性、熱伝導率)	50	50	800	1150	—	Mg1/9B.C(α) リファレンスB.C B.C/SiC(=)	47.8 90 90	95 95 92				PNC316	内側管 12.90	内側管 16.90	内側管 2.00	無	>1.0	熱伝導率測定用の フィス試験を含める。	
			50	200	800	1150	AMIR-10, 11	Mg1/9B.C(α) リファレンスB.C B.C/SiC(=)	47.8 90 90	95 95 92					外側管 18.00	外側管 21.00	外側管 1.50				
			50	50	800	1150	—	Mg1/9B.C(β) リファレンスB.C B.C/BN	90 90 90	95 95 90											
			50	200	800	1150	AMIR-10, 11	Mg1/9B.C(β) リファレンスB.C B.C/BN	90 90 90	95 95 90											

*1 シュラウドは内面温度、ペレット中心温度を示す。新型制御材は内側キャプセル管内面温度を示す。

*2 (直径ギャップ) = (キャプセル管内径) - (シュラウド管外径)、高性能制御材については(外側キャプセル管内径) - (内側キャプセル管外径)とする。

表2-1-2 B₄Cペレット仕様

B ₄ C材質	¹⁰ B濃縮度 at%	¹⁰ B数 ×10 ¹² 個/m ³	相対密度 %T.D.	理論密度 ×10 ⁻³ kg/m ³
Mg入りB ₄ C (コ ^{*1})	47.8	4.91	95	2.46
リファレンスB ₄ C	90	9.44	95	2.39
B ₄ C/SiC(ニ ^{*2}) (80/20) ^{*4}	90	7.98	92	2.44
Mg入りB ₄ C (デ ^{*3})	90	9.46	95	2.39
リファレンスB ₄ C	90	9.44	95	2.39
B ₄ C/BN (40/60) ^{*4}	90	5.53	90	2.34

*1 : Cogema フランス原子燃料公社製

*2 : ハイニカロン

*3 : 電気化学工業製

*4 () : 体積の配合割合

表3-1-1 各燃焼度における実測値と計算値との関係

MAGI計算燃焼度	81	84	101	75	82	81	72	102	125	84	96	102
実測燃焼度	119	117	123	104	109	108	106	144	148	135	120	137
補正值 k_0	0.681	0.718	0.821	0.721	0.752	0.750	0.679	0.708	0.845	0.622	0.800	0.745

※尚、燃焼度の単位は $\times 10^{26}$ cap/m³ とする。

表3-1-2 各物質の熱伝導度

物質名	熱伝導度[$\times 10^2$ W/m \cdot K] = A + BT + CT ²			出典
	A	B	C	
B ₄ C	7.392E-2	-6.170E-5	5.290E-8	「常陽」MK-II C/RのPIE結果より 算出した近似式
Na	9.294E-1	-5.890E-4	1.173E-7	大洗工学センター原子炉設置変更許可 申請書記載値（高速実験炉設置変更） その14.添付書類8より引用
SUS316	1.323E-1	1.311E-4		大洗工学センター原子炉設置変更許可 申請書記載値（高速実験炉設置変更） その14.添付書類8より引用
SiC	1.000E-1			SiCシュラウド管炉外測定値
Al ₂ O ₃	3.183E-1	-5.767E-4	3.488E-7	京セラA479値
Nb	5.342E-1	1.527E-4	-1.869E-9	Fundamental of Heat and Mass Transfer
Cr	1.023E-0	-7.953E-4	3.937E-7	日本機械学会編 電熱工学資料 第4版 (1986)
He	1.429E-3	3.326E-6	-6.21E-10	照射課メモ (照-56-202)

表3-1-3 HEATING-5による温度計算結果

試験キャプセル タイプ	シュラウド仕様	キャプセルNo.	AMIR-8設計 燃焼度 E26 cap/m ²	ペレット寸法 mm	シュラウド寸法 mm	キャプセル管寸法 mm	直径ギャップ*1 mm	温度 ℃ *2			
								目標値	計算値 *4 (補正無し)	計算値 *5 (補正有り)	
Na ポ ン ド	Na半封入 (A type)	Crコート加工	8A1	46.4	15.96 × 50.0 ℓ	16.34 × 16.06 × 0.14t	20.00 × 17.96 × 1.02t	1.62	450/900	515/996	500/892
			8A2	41.8	↑	↑	↑	↑	↑	493/932	479/836
	Na封入 (B type)	Crコート加工	8B1	59.8	12.61 × 30.0 ℓ	12.99 × 12.71 × 0.14t	16.90 × 14.86 × 1.02t	1.87	↑	529/912	517/828
			8B2	44.6	↑	↑	↑	↑	↑	487/779	476/711
		Crコート無	8B3	60.8	12.65 × 30.0 ℓ	12.95 × 12.75 × 0.10t	↑	1.91	↑	532/923	516/834
	Na流通 (C type)	Crコート無	8C1	56.2	↑	↑	↑	↑	↑	512/840	498/768
	He ポ ン ド	高温シュラウド (D type)	Nb-1Zr	8D1	47.5	12.40 × 40.0 ℓ	12.90 × 12.50 × 0.20t	16.90 × 14.90 × 1.00t	2.00	1100/1350	1114/1271
8D2				47.0	↑	↑	↑	↑	↑	1051/1219	943/1092
SiC/Al ₂ O ₃			8D3	48.3	12.20 × 40.0 ℓ	12.90 × 12.30 × 0.30t	↑	↑	↑	1120/1274	1010/1146
			8D4	48.6	↑	↑	↑	↑	↑	1099/1256	987/1127
新型制御材 (E,F type)			8E1	47.4	11.80 × 37.5 ℓ *4	内側管 16.90 × 12.90 × 2.00t	外側管 21.00 × 18.00 × 1.50t	1.10 *5	800/1150	840/1364	770/1225
			8E2	46.6	↑	↑	↑	↑	↑	834/1352	764/1214
			8E3	43.2	↑	↑	↑	↑	↑	817/1306	753/1176
			8E4	37.6	↑	↑	↑	↑	↑	752/1208	693/1085

*1 (直径ギャップ) = (キャプセル管内径) - (シュラウド外径)

*2 <シュラウド内表面温度/ペレット中心温度>

*3 2重管構造のため(直径ギャップ) = (外側キャプセル管内径) - (内側キャプセル管外径)

*4 MAGIコード計算による燃焼度を直接採用したもの

*5 MAGIコード計算結果に対して0.8の補正係数を掛けたもの

表3-1-4 プレナム体積算出に伴って用いる各変数

He放出量	$V_{\text{He}} (\text{cm}^3)$
He生成量	$V'_{\text{He}} (\text{mol})$
ペレット体積	$V_p (\text{cm}^3)$
外側キャプセル管 平均直径	$D_m (\text{mm})$
外側キャプセル管外径	$D_o (\text{mm})$
外側キャプセル管内径	$D_i (\text{mm})$
プレナム圧力	$P (\text{kgf}/\text{mm}^2)$
プレナム体積	$V_{\text{pl}} (\text{cm}^3)$
プレナム長さ	$l (\text{mm})$
Hoop応力	$\sigma_{\theta} (\text{atm})$
Hoop応力限界値	$S_m (=10.4) (\text{kgf}/\text{mm}^2)$
外側キャプセル管肉厚	$t (\text{mm})$

但し、 $1 \text{ atm} = 101.3 \text{ kPa}$

$1 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 98.0665 \text{ kPa}$

$1 \text{ atm} = 1.0329 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 0.010329 \text{ kgf}/\text{mm}^2$

である。

表3-1-5 プレナム体積の算出

試験キャプセルタイプ		シュラウド仕様	キャプセル No.	ペレット外径 (mm)	ペレット高さ (mm)	ペレット体積 (cm ³)	目標燃焼度 E26 cap/m ²	He生成量 (mol)	He放出量 (cm ³)	外側管外径 (mm)	外側管内径 (mm)	外側管平均直径 (mm)	キャプセル管肉厚 (mm)	プレナム長 *1 (mm)	プレナム体積 *1 (cm ³)	
Na ボ ン ド	Na封入型	Crコート加工	8B1	12.61	30.00	3.75	50	0.0311	1972.5	16.90	14.86	15.88	1.02	125.62	21.79	
			8B2	12.61	30.00	3.75	200	0.1244	7890.8	16.90	14.86	15.88	1.02	502.50	87.15	
	(B type)	Crコート無	8B3	12.65	30.00	3.77	50	0.0313	1985.2	16.90	14.86	15.88	1.02	126.42	21.93	
He ボ ン ド	高温シュラウド	Nb-1Zr	8D1	12.40	40.00	4.83	50	0.0401	2543.4	16.90	14.90	15.90	1.00	164.53	28.69	
			8D2	12.40	40.00	4.83	150	0.1203	7630.1	16.90	14.90	15.90	1.00	493.59	86.06	
		(D type)	SiC/Al ₂ O ₃	8D3	12.20	40.00	4.68	50	0.0388	2462.2	16.90	14.90	15.90	1.00	159.28	27.77
				8D4	12.20	40.00	4.68	150	0.1165	7385.9	16.90	14.90	15.90	1.00	477.79	83.31
	新型制御材	(E,F type)		8E1	11.80	37.50	4.10	50	0.0340	2159.0	21.00	18.00	19.50	1.50	78.25	19.91
				8E2	11.80	37.50	4.10	200	0.1362	8637.3	21.00	18.00	19.50	1.50	313.03	79.66
				8E3	11.80	37.50	4.10	50	0.0340	2159.0	21.00	18.00	19.50	1.50	78.25	19.91
				8E4	11.80	37.50	4.10	200	0.1362	8637.3	21.00	18.00	19.50	1.50	313.03	79.66

*1 必要最小値

表3-1-6 プレナム長の比較

試験キャプセル タイプ		シュラウド 仕様	キャプセルNo.	計算による必要 プレナム長 (mm)	設計 プレナム長 (mm)	
Na ボ ン ド	Na封入型	Crコート加工	8B1	125.62	535	
			8B2	502.50	↑	
	(B type)	Crコート無	8B3	126.42	↑	
He ボ ン ド	高温 シュラウド	Nb-1Zr	8D1	164.53	527	
			8D2	493.59	660	
	(D type)	SiC/Al ₂ O ₃	8D3	159.28	527	
			8D4	477.79	660	
	新型制御材		8E1	78.25	360	
			8E2	313.03	↑	
			(E ,F type)	8E3	78.25	↑
				8E4	313.03	↑

表3-1-7 残留ギャップ量の変化

試験キャプセル タイプ		シュラウド仕様	キャプセルNo.	目標燃焼度 E26 cap/m ³	照射前 シュラウド外径 *1 (mm)	照射後 シュラウド外径 *1*2 (mm)	キャプセル 管内径 (mm)	キャプセル管/ シュラウド間の ギャップ幅 *3 (mm)
Na ボ ン ド	Na半封入 (A type)	Crコート加工	8A1	50	16.34	16.74	17.96	1.22
			8A2	200	16.34	17.95	17.96	0.01
	Na封入 (B type)	Crコート加工	8B1	50	12.99	13.31	14.86	1.55
			8B2	200	12.99	14.26	14.86	0.60
		Crコート無	8B3	50	12.95	13.27	14.86	1.59
	Na流通 (C type)	Crコート無	8C1	50	12.95	13.27	14.86	1.59
He ボ ン ド	高温シュラウド (D type)	Nb-1Zr	8D1	50	12.90	13.21	14.90	1.69
			8D2	150	12.90	13.84	14.90	1.06
		SiC/Al ₂ O ₃	8D3	50	12.90	13.21	14.90	1.69
			8D4	150	12.90	13.82	14.90	1.08
	新型制御材 (E,F type)		8E1	50	16.90	17.22	18.00	0.78
			8E2	150	16.90	17.87	18.00	0.13
			8E3	50	16.90	17.22	18.00	0.78
			8E4	150	16.90	17.87	18.00	0.13

*1 E,Ftype については内側キャプセル管外径を示す

*2 シュラウド肉厚は照射により変化しないものとする

*3 目標燃焼度における残留ギャップ (直径) であり、(設計によるキャプセル管内径)・(照射後シュラウド外径) と示される。

表3-2-1 AMIR-8 照射キャプセルの設置寸値

キャプセルタイプ	内部挿入 配置	キャプセル No.	設計燃焼度 ($\times 10^{14}$ cap/m ²)	設計 照射温度*1 (°C)	総照射 時間	ペレット				シュラウド管						キャプセル管					備考																	
						材質	濃縮度 %B at. %	密度 %T.D.	寸法 mm	材質	外径 mm	内径 mm	肉厚 mm	長さ mm	コーティング	材質	外径 mm	内径 mm	肉厚 mm	コーティング		ギャップ** mm																
																							AMIR-8 / 最終燃焼度	シュラウド / ペレット	材質	外径 mm	内径 mm	肉厚 mm	コーティング	材質	外径 mm	内径 mm	肉厚 mm	コーティング				
Heガス シュラウド	半封入	3U	8A1	46.4 / -	500 / 892	—	B.C	90	90	15.96 × 25.0	PNC316	16.34	16.06	0.14	60	Cr	PNC316	20.00	17.96	1.02	Cr	1.62																
		4U	8A2	41.8 / 200	479 / 836	AMIR-10, 11	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"															
	封入	2U	8B1	59.8 / -	517 / 828	—	"	"	95	12.61 × 30.0	PNC-FMS	12.99	12.71	0.14	41.5	"	PNC316	16.90	14.86	"	"	1.87	ネラスタリ 2種															
		5U	8B2	44.6 / 200	476 / 711	AMIR-10, 11	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	ネラスタリ 2種 ディスク材料 PNC316 PNC-FMS															
		1U	8B3	60.8 / -	516 / 834	—	"	"	"	12.65 × 30.0	"	12.95	12.75	0.10	"	無	"	"	"	"	"	"	1.91															
	流通	6U	8C1	56.2 / -	498 / 768	—	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"															
Heガス シュラウド	高温 シュラウド	4L	8D1	47.5 / -	1001 / 1141	—	"	"	"	12.4 × 20.0	Nb-1Zr	12.90	12.50	0.20	26.0	"	"	"	14.90	1.00	無	2.00																
		3L	8D2	47.0 / 150	943 / 1092	AMIR-10	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"																
		5L	8D3	48.3 / -	1010 / 1146	—	"	"	"	12.2 × 20.0	SiC 7#3	12.90 12.90	12.30 12.30	0.30 0.30	26.0 26.0	"	"	"	"	"	"	"	"															
		6L	8D4	48.6 / 150	987 / 1127	AMIR-10	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"															
Heガス 2重 キャプセル	新製 脚材	1L	8E1	47.4 / -	770 / 1225	—	Mg/7B.C(α) 77.0/78.0 B.C/SiC(-)	47.8 90 95	95 95 92	各材質 ペレット 11.8 × 10.0 ディスク 11.8 × 2.5	/	/	/	/	/	/	/	PNC316	内側管 16.90	12.90	2.00	無	1.10															
		2L	8E2	46.6 / 150	764 / 1214	AMIR-10	Mg/7B.C(α) 77.0/78.0 B.C/SiC(-)	47.8 90 95	95 95 92																													
		軸U	8E3	43.2 / -	753 / 1176	—	Mg/7B.C(γ) 77.0/78.0 B.C/BN	90 90 90	95 95 90																													
		軸L	8E4	37.6 / 150	693 / 1085	AMIR-10	Mg/7B.C(γ) 77.0/78.0 B.C/BN	90 90 90	95 95 90																													

*1 シュラウドは内面温度、ペレット中心温度を示す。新製脚材は内側キャプセル管内面温度を示す。

*2 (直径ギャップ) = (キャプセル管内径) - (シュラウド管外径) (高性能脚材については外側キャプセル管内径と内側キャプセル管外径とのギャップを示す。)

表3-2-2. ポーラスプラグ仕様

	繊維焼結タイプ(NF ^{*1})	粉末焼結タイプ(SM ^{*2})
構造	(a)繊維と金網を焼結した 2層構造 (NF15LM1) (b)繊維単体 (NF13)	単層構造
寸法 (mm) (濾過体)	(a)d=8、t=0.2 (b)d=8、t=0.8	d=8、t=5
公称濾過精度 (μm)	(a)100 (b)60	100
繊維径 (μm)	(a)50 (b)25	
粉末径 (μm)		500~710

*1 NF ; 日本精線

*2 SM ; SMC (株)

表3-2-3. 設計照射条件

試験キャプセルタイプ	キャプセル No.	目標燃焼度 10^{26} cap/m ³	AMIR-8設計値 (MAGI) 10^{26} cap/m ³	目標照射温度 ²⁾ ℃	設計照射温度 ²⁾ ℃ (HEATING-5)
Naボンド	8A1	50	46.4	450 (900)	500 (892)
	8A2	200 ¹⁾	41.8	450 (900)	479 (836)
	8B1	50	59.8	450 (900)	517 (828)
	8B2	200 ¹⁾	44.6	450 (900)	476 (711)
	8B3	50	60.8	450 (900)	516 (834)
	8C1	50	56.2	450 (900)	498 (768)
Heボンド	8D1	50	47.5	1100 (1350)	1001 (1141)
	8D2	200 ¹⁾	47.0	1100 (1350)	943 (1092)
	8D3	50	48.3	1100 (1350)	1010 (1146)
	8D4	200 ¹⁾	48.6	1100 (1350)	987 (1127)
	8E1	50	47.4	800 (1150)	770 (1225)
	8E2	200 ¹⁾	46.6	800 (1150)	764 (1214)
	8E3	50	43.2	800 (1150)	753 (1176)
	8E4	200 ¹⁾	37.6	800 (1150)	693 (1085)

¹⁾AMIR-10,11への継続照射を示す。ただし、今回のMAGI計算ではAMIR-8のみの燃焼度を示してある。

²⁾照射温度についてはシュラウド（一部内側キャプセル管）内面の温度を示し、カッコ内はペレット中心温度を示す。

寿命制限因子

対策

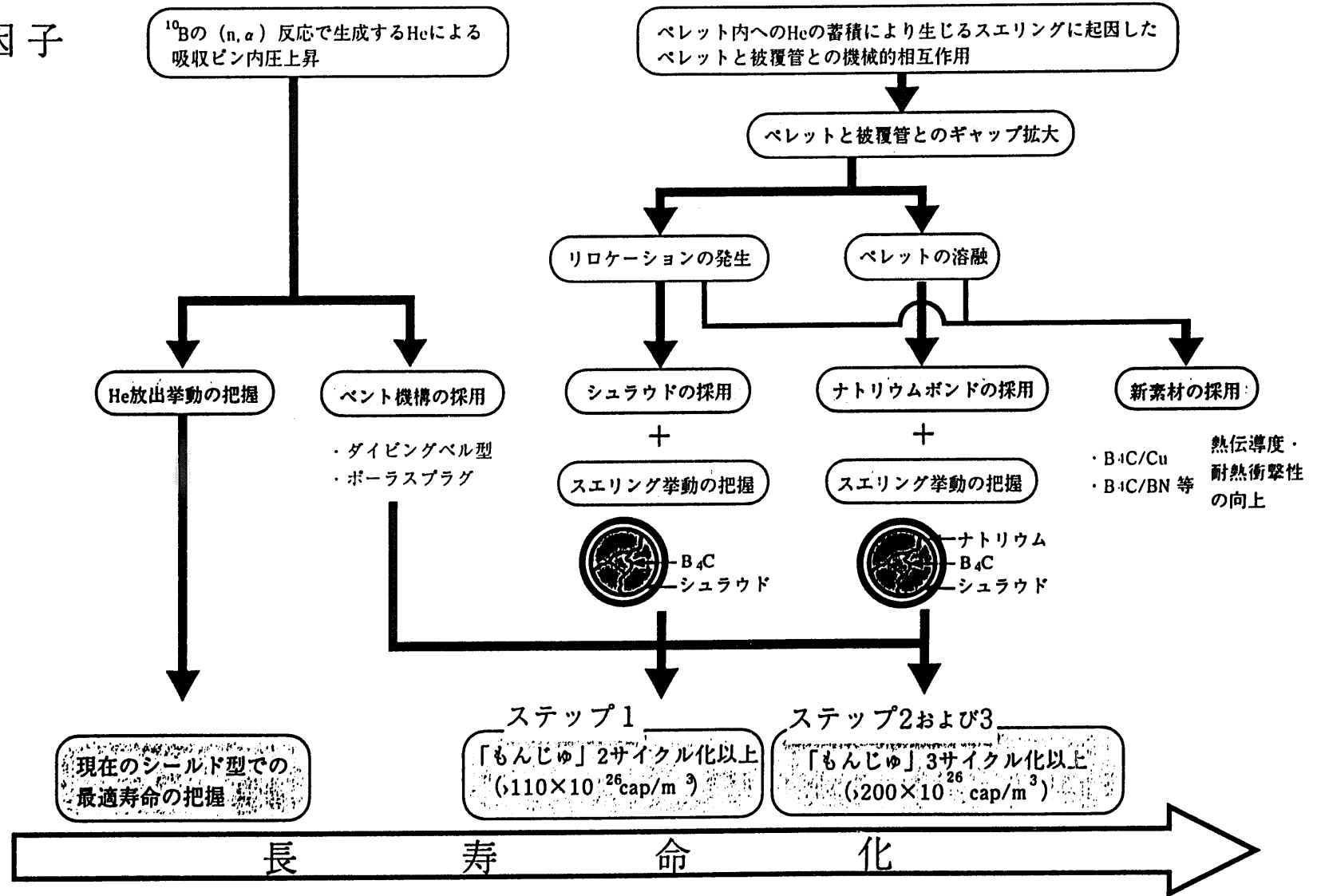


図1-1 制御棒の寿命制限因子と対策

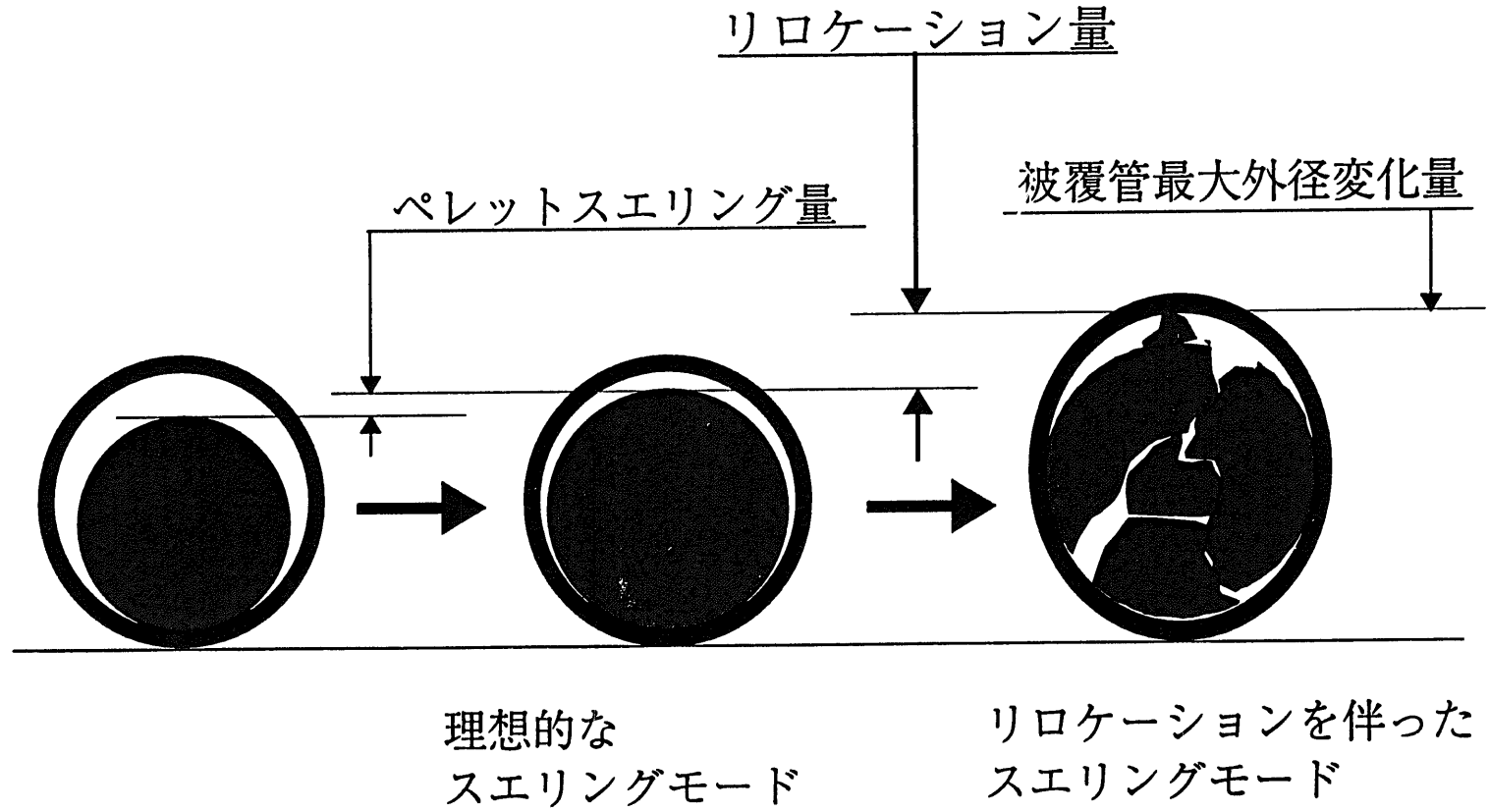
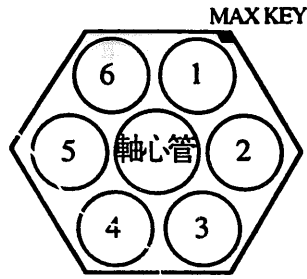


図1-2 リロケーション概念図



照射期間：第31cy～33cy (170EFPD)
 装荷位置：6D6

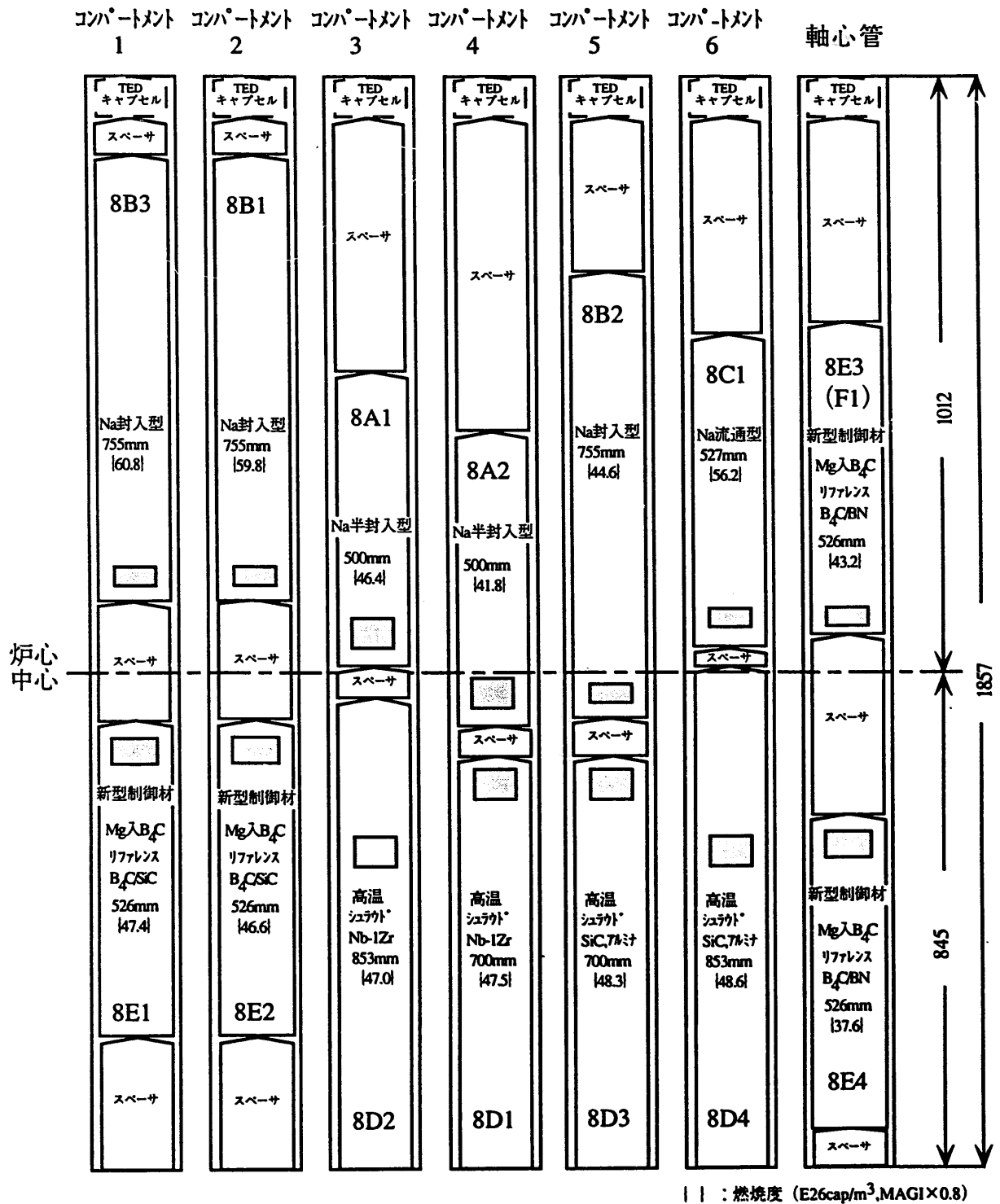


図3-1-1 コンパートメント内配置図

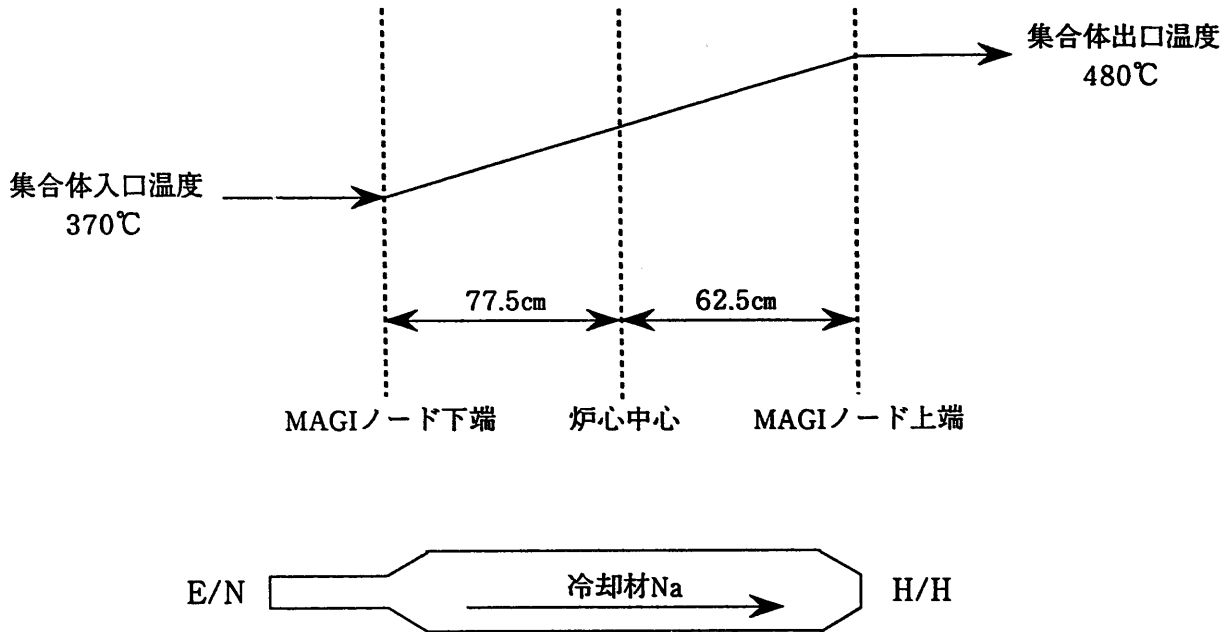


図3-1-2 リグ内冷却材軸方向温度分布 (照射課メモ：照-(7)-243より抜粋)

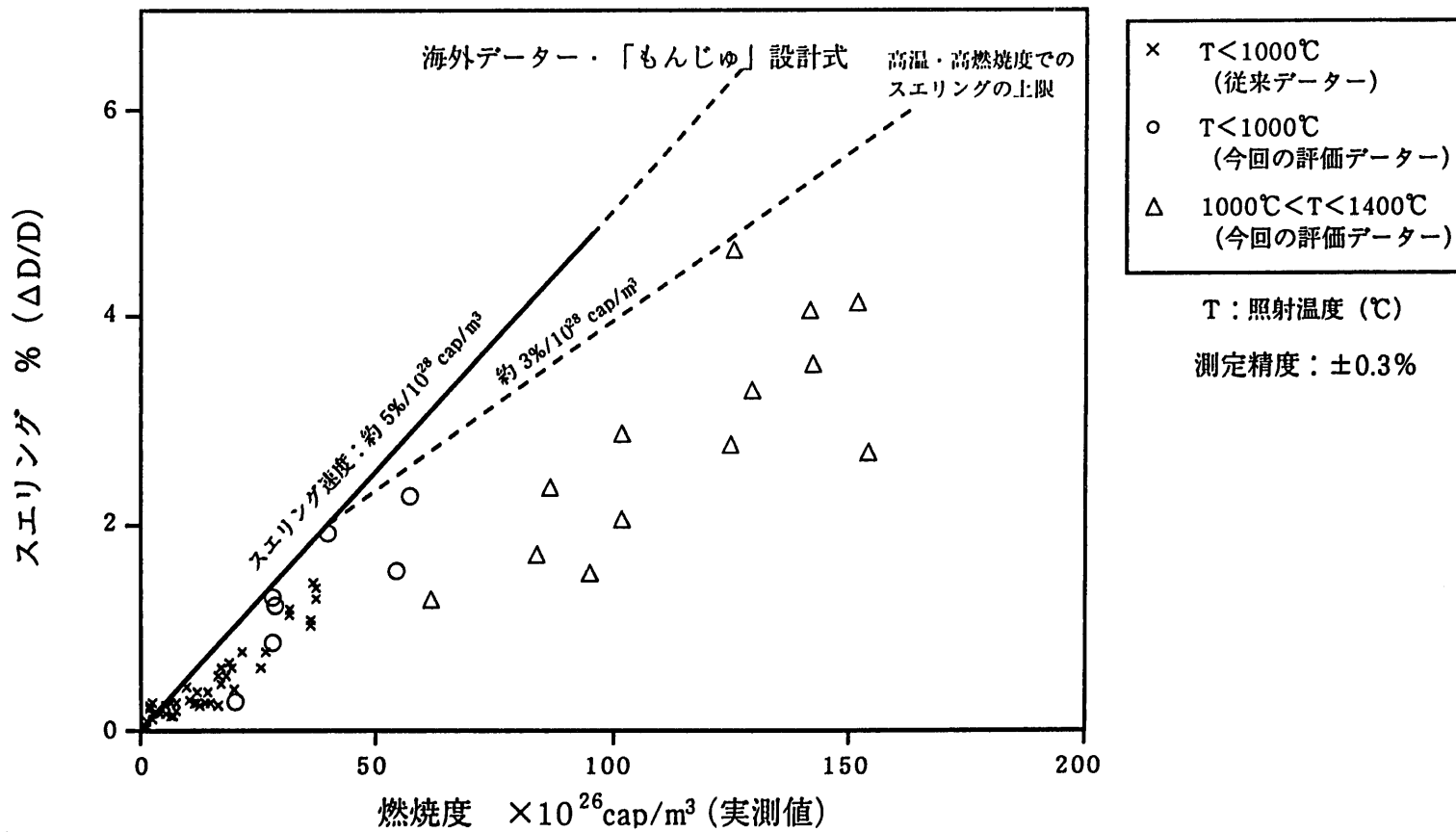
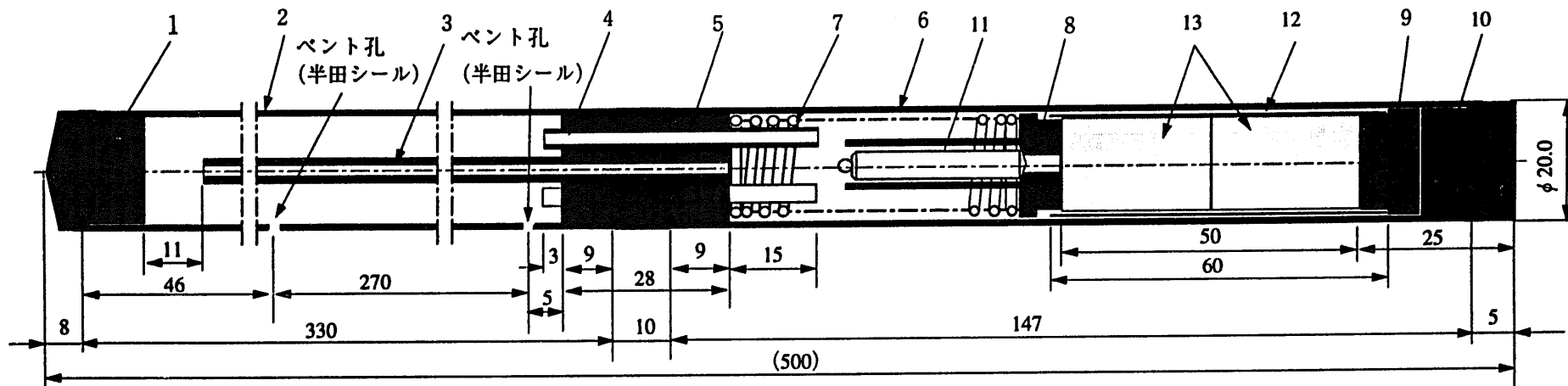


図3-1-3 スエリングの燃焼度依存性

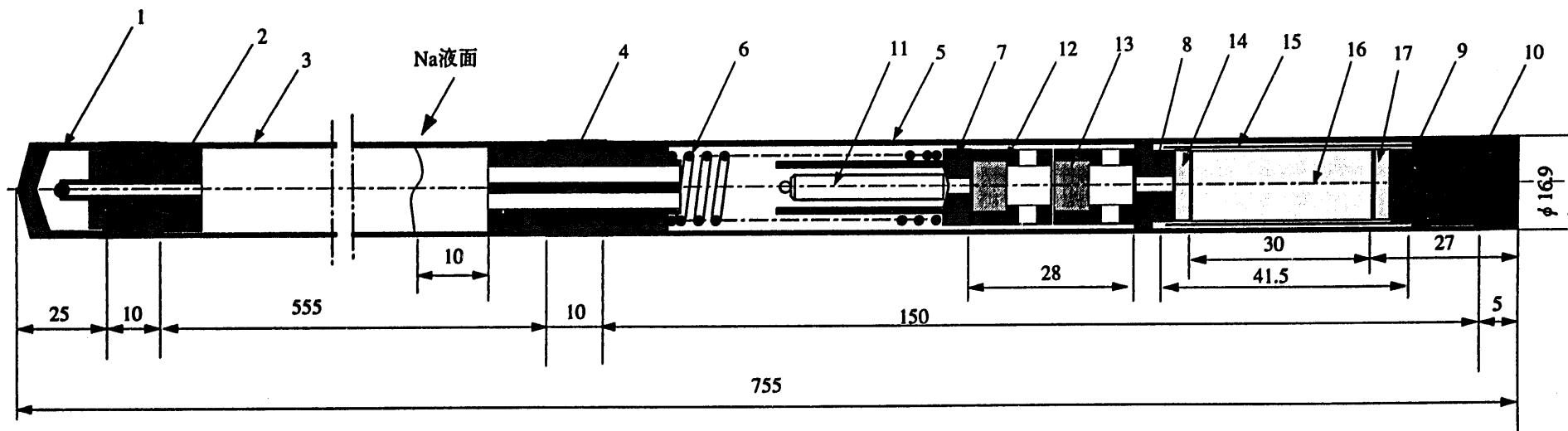


No.	部品名	材質	No.	部品名	材質
1	上部端栓	SUS316	10	下部端栓	SUS316
2	上部キャップ管	PNC316	11	温度モニター	TED
3	ベント管	SUS316	12	シュラウド管	PNC316
4	Na導入管	SUS316	13	ペレット試料	B ₄ C
5	中間端栓	SUS316	14		
6	下部キャップ管	PNC316	15		
7	スプリング	SUS316	16		
8	上部ペレット押さえ	SUS316	17		
9	下部ペレット押さえ	SUS316	18		

8A1,8A2

図3-2-1 Aタイプ キャプセル図 (Naボンド・シュラウド)

Na半封入型

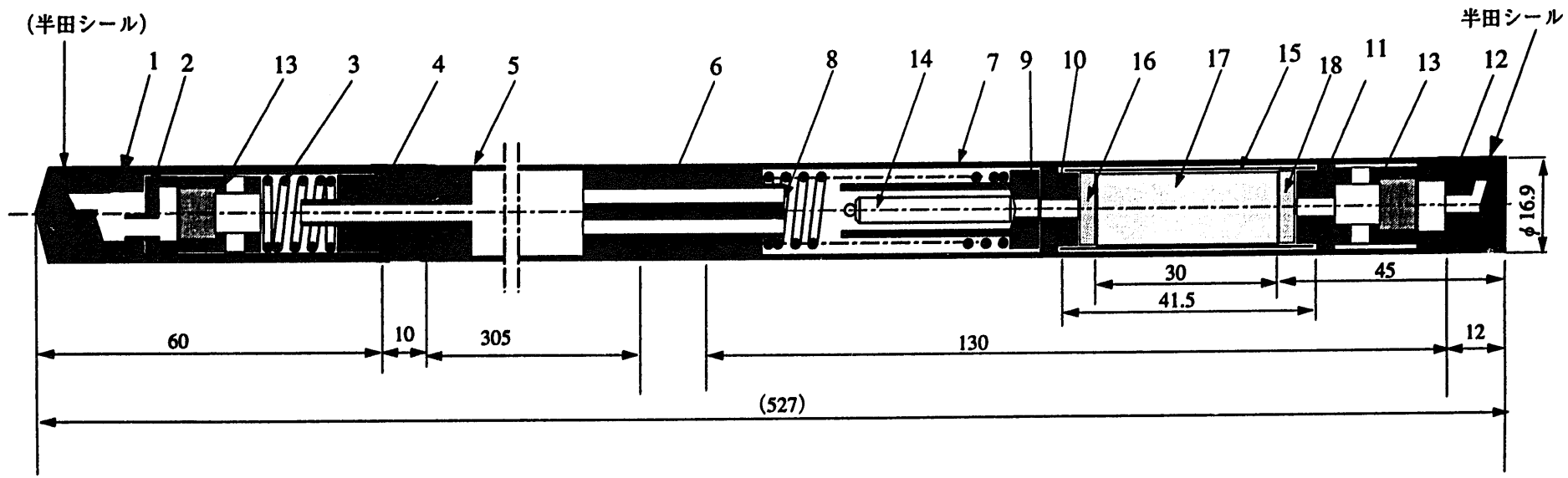


No.	部品名	材質	No.	部品名	材質
1	上部端栓A	SUS316	10	下部端栓	SUS316
2	上部端栓B	SUS316	11	温度モニター	TED
3	上部キャプセル管	PNC316	12	ポーラスプラグ (繊維体)	SUS316L
4	中間端栓	SUS316	13	ポーラスプラグ (粉末体)	SUS316L
5	下部キャプセル管	PNC316	14	ディスク試料A	PNC316
6	スプリング	SUS316	15	シュラウド管	PNCFMS
7	下部スプリング押さえ	SUS316	16	ペレット試料	B ₄ C
8	上部ペレット押さえ	SUS316	17	ディスク試料B	PNCFMS
9	下部ペレット押さえ	SUS316	18		

8B1,8B2,8B3

図3-2-2 Bタイプ キャプセル図 (Naボンド・シュラウド)

Na封入型

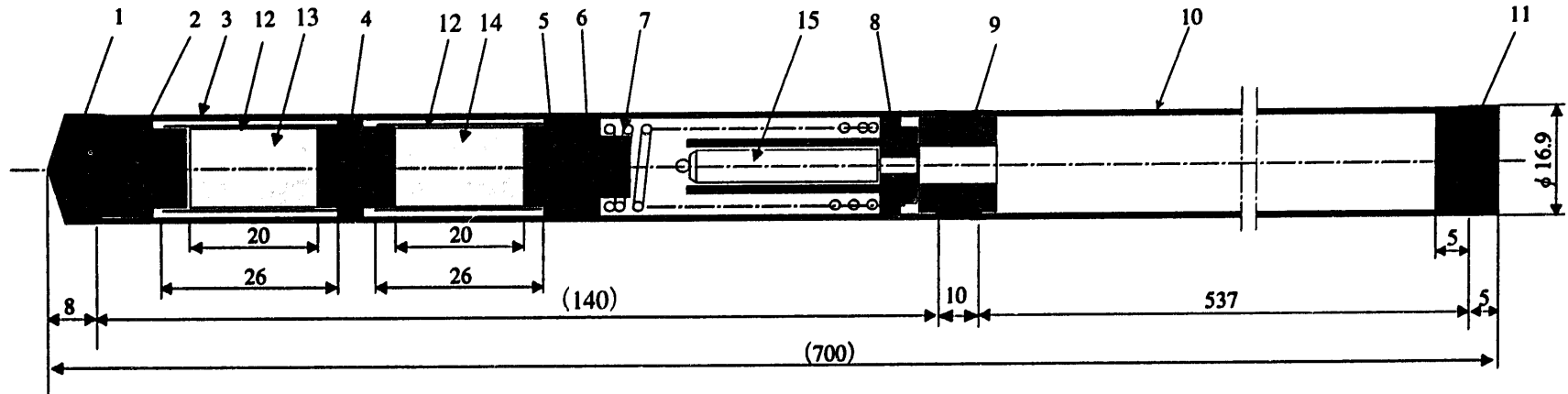


No.	部品名	材質	No.	部品名	材質
1	上部端栓 A	SUS316	11	下部ベレット押さえ	SUS316
2	ノズル	SUS316	12	下部端栓	SUS316
3	スプリングA	SUS316	13	ポーラスプラグ (繊維体)	SUS316L
4	上部端栓 B	SUS316	14	温度モニター	TED
5	上部キャプセル管	PNC316	15	シュラウド管	PNCFMS
6	中間端栓	SUS316	16	ディスク試料 A	PNC316
7	下部キャプセル管	PNC316	17	ベレット試料	B ₄ C
8	スプリングB	SUS316	18	ディスク試料 B	PNCFMS
9	下部スプリング押さえ	SUS316	19		
10	上部ベレット押さえ	SUS316	20		

8C1

図3-2-3 Cタイプ キャプセル図(Naボンド・シュラウド)

Na流通型

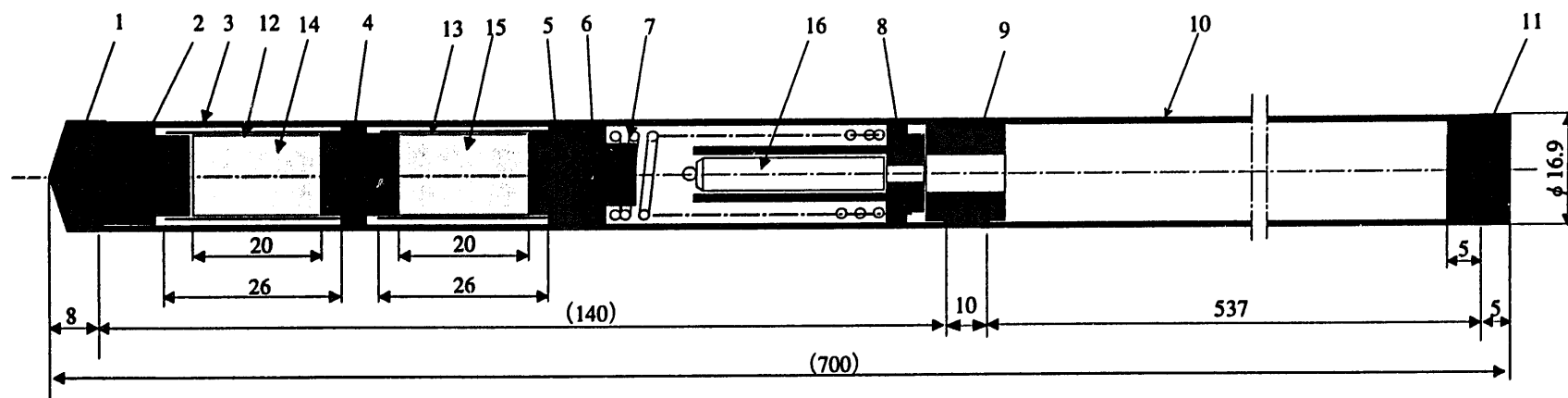


No.	部品名	材質	No.	部品名	材質
1	上部端栓	SUS316	9	中間端栓	SUS316
2	上部ペレット押さえ	SUS316	10	下部キャプセル管	PNC316
3	上部キャプセル管	PNC316	11	下部端栓	SUS316
4	スペーサー	SUS316	12	シュラウド管	Nb-1Zr
5	下部ペレット押さえ	SUS316	13	ペレット試料 A	B ₄ C
6	上部スプリング押さえ	SUS316	14	ペレット試料 B	B ₄ C
7	スプリング	SUS316	15	温度モニター	TED
8	下部スプリング押さえ	SUS316	16		

8D1

図3-2-4(a) D-1-Aタイプキャプセル図 (Heボンド・シュラウド)

高温シュラウド (Nb-1Zrシュラウド)

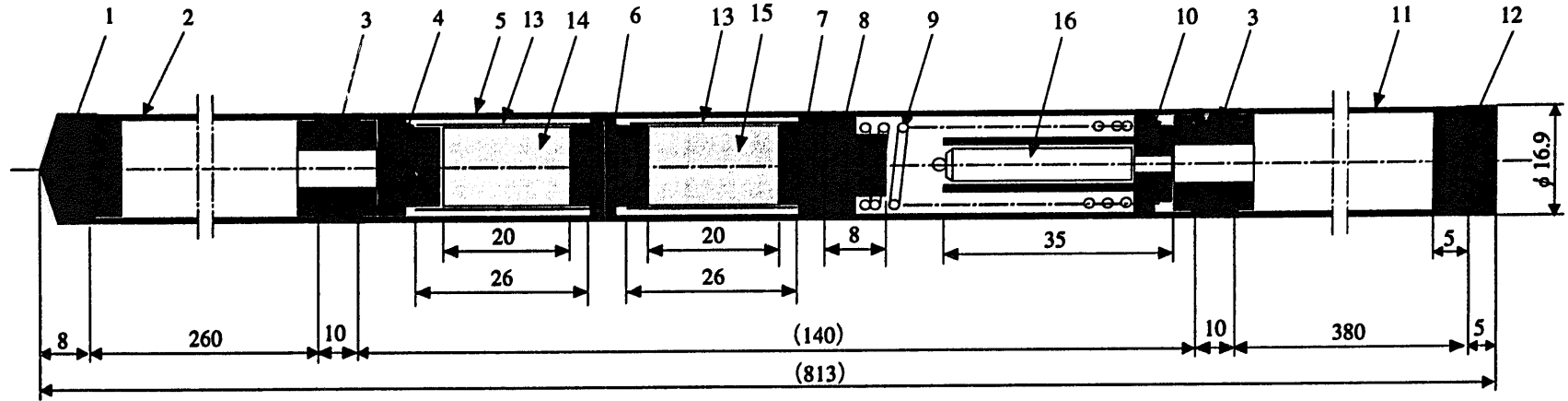


No.	部品名	材質	No.	部品名	材質
1	上部端栓	SUS316	9	中間端栓	SUS316
2	上部ペレット押さえ	SUS316	10	下部キャプセル管	PNC316
3	上部キャプセル管	PNC316	11	下部端栓	SUS316
4	スペーサー	SUS316	12	シュラウド管 A	SiC
5	下部ペレット押さえ	SUS316	13	シュラウド管 B	アルミナ
6	上部スプリング押さえ	SUS316	14	ペレット試料 A	B ₄ C
7	スプリング	SUS316	15	ペレット試料 B	B ₄ C
8	下部スプリング押さえ	SUS316	16	温度モニター	TED

8D3

図3-2-4(b) D-1-Bタイプキャプセル図 (Heボンド・シュラウド)

高温シュラウド (SiC/アルミナ シュラウド)

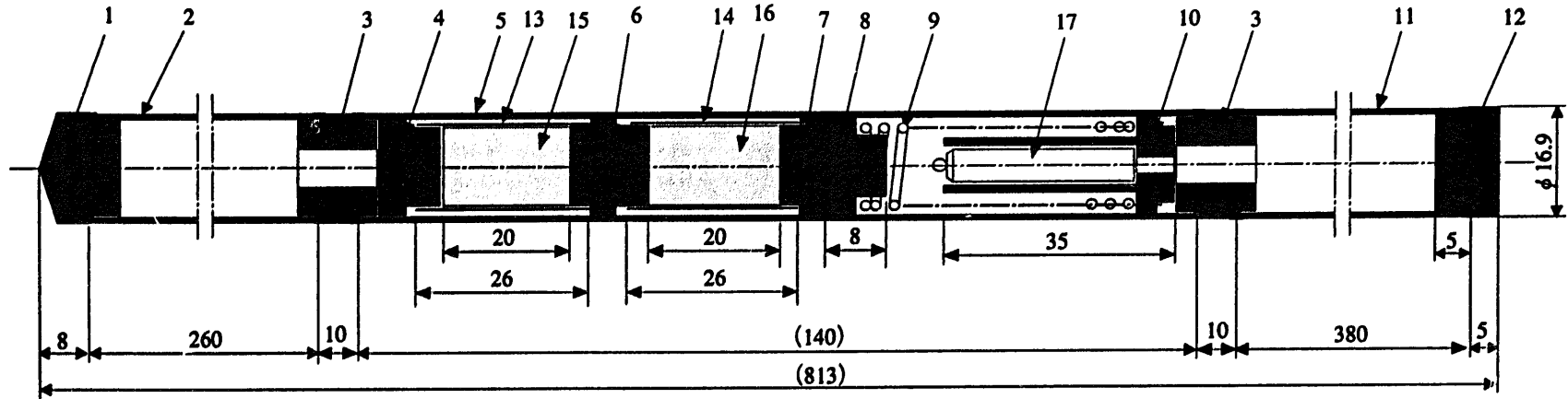


No.	部品名	材質	No.	部品名	材質
1	上部端栓	SUS316	9	スプリング	SUS316
2	上部キャプセル管	PNC316	10	下部スプリング押さえ	SUS316
3	中間端栓	SUS316	11	下部キャプセル管	PNC316
4	上部ベレット押さえ	SUS316	12	下部端栓	SUS316
5	中間キャプセル管	PNC316	13	シュラウド管	Nb-1Zr
6	スペーサー	SUS316	14	ベレット試料 A	B ₄ C
7	下部ベレット押さえ	SUS316	15	ベレット試料 B	B ₄ C
8	上部スプリング押さえ	SUS316	16	温度モニター	TED

8D2

図3-2-5(a) D-2-Aタイプキャプセル図 (Heボンド・シュラウド)

高温シュラウド(Nb-1Zr シュラウド)

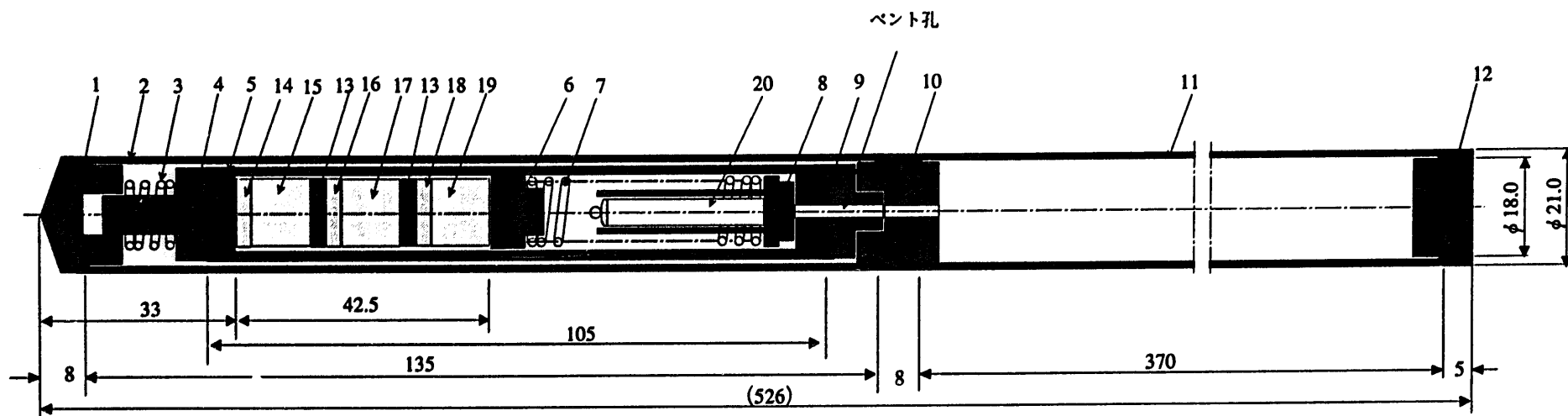


No.	部品名	材質	No.	部品名	材質
1	上部端栓	SUS316	9	スプリング	SUS316
2	上部キャプセル管	PNC316	10	下部スプリング押さえ	SUS316
3	中間端栓	SUS316	11	下部キャプセル管	PNC316
4	上部ペレット押さえ	SUS316	12	下部端栓	SUS316
5	中間キャプセル管	PNC316	13	シュラウド管 A	SiC
6	スペーサー	SUS316	14	シュラウド管 B	アルミナ
7	下部ペレット押さえ	SUS316	15	ペレット試料 A	B ₄ C
8	上部スプリング押さえ	SUS316	16	ペレット試料 B	B ₄ C
			17	温度モニター	TED

8D4

図3-2-5(b) D-2-Bタイプキャプセル図 (Heボンド・シュラウド)

高温シュラウド(SiC/アルミナ シュラウド)

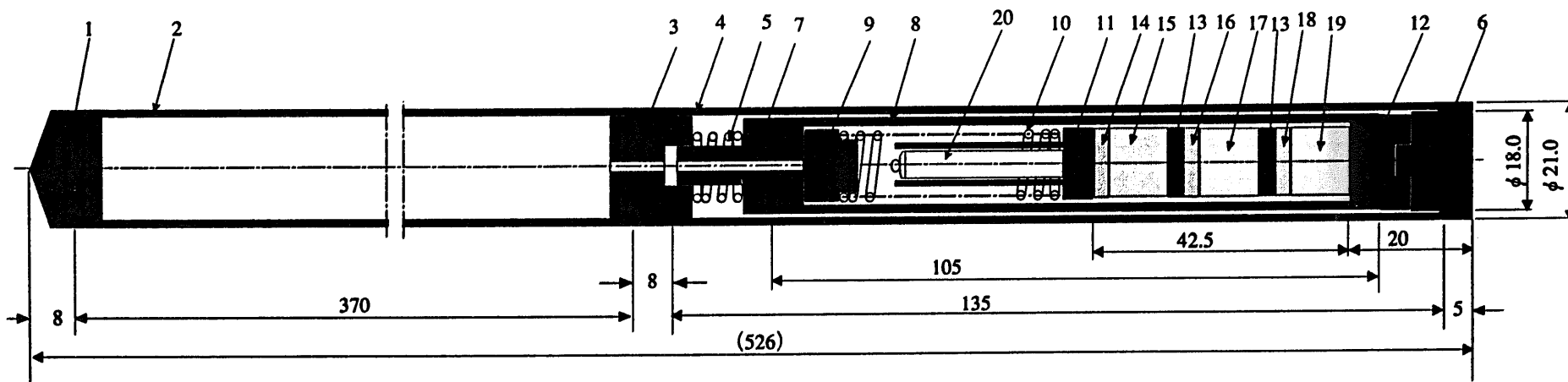


No.	部品名	材質	No.	部品名	材質
1	外管上部端栓	SUS316	11	下部キャプセル管	PNC316
2	外管上部キャプセル管	PNC316	12	外管下部端栓	SUS316
3	スプリングA	SUS316	13	スペーサー	SUS316 2.5t
4	内管上部端栓	SUS316	14	ディスク試料 A	B ₄ C
5	内管キャプセル管	SUS316	15	ペレット試料 A	B ₄ C
6	上部スプリング押さえ	SUS316	16	ディスク試料 B	B ₄ C
7	スプリングB	PNC316	17	ペレット試料 B	B ₄ C
8	下部スプリング押さえ	PNC316	18	ディスク試料 C	B ₄ C
9	内管下部端栓	PNC316	19	ペレット試料 C	B ₄ C
10	中間端栓	PNC316	20	温度モニター	TED

8E1	8E2	8E4
B ₄ C/Mg(C)	B ₄ C/Mg(C)	B ₄ C/Mg(D)
B ₄ C/Mg(C)	B ₄ C/Mg(C)	B ₄ C/Mg(D)
B ₄ C	B ₄ C	B ₄ C
B ₄ C	B ₄ C	B ₄ C
B ₄ C/SiC	B ₄ C/SiC	B ₄ C/BN
B ₄ C/SiC	B ₄ C/SiC	B ₄ C/BN

図3-2-6 Eタイプキャプセル図 (Heボンド、2重管)

新型制御材



No.	部品名	材質	No.	部品名	材質
1	外管上部端栓	SUS316	11	下部スプリング押さえ	PNC316
2	外管上部キャプセル管	PNC316	12	内管下部端栓	SUS316
3	中間端栓	SUS316	13	スペーサー	SUS316 2.5t
4	外管下部キャプセル管	SUS316	14	ディスク試料 A	B4C
5	スプリングA	SUS316	15	ペレット試料 A	B4C
6	外管下部端栓	SUS316	16	ディスク試料 B	B4C
7	内管上部端栓	SUS316	17	ペレット試料 B	B4C
8	内管キャプセル管	SUS316	18	ディスク試料 C	B4C
9	上部スプリング押さえ	SUS316	19	ペレット試料 C	B4C
10	スプリングB	SUS316	20	温度モニター	TED

8E3
 B4C/Mg(D)
 B4C/Mg(D)
 B4C
 B4C
 B4C/BN
 B4C/BN

図3-2-7 Fタイプキャプセル図 (Heボンド、2重管)

新型制御材