

分置

# 熔融燃料排出機能を備えた自己作動型炉停止装置の概念

1993年11月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

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ください。

〒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

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

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

## 溶融燃料排出機能を備えた自己作動型炉停止装置の概念

丹羽 元\*

### 要 旨

通常の燃料交換機によって炉心内に装荷することができる集合体形状を持ち、燃料ピン束を内蔵し、かつ炉心損傷時には溶融燃料を炉心外へ排出する経路を備えた自己作動型炉停止装置を考案した。ここではこの装置の概念を説明し、大型FBRに適用した場合の成立性を概略評価した。

本装置は深層防護の考え方を炉心損傷事故に適用した場合の2つのレベル、即ち炉心損傷事故の拡大防止と影響緩和とに対応させて、原子炉停止失敗事故時の自己作動型炉停止機能と炉心損傷事故時再臨界回避用の溶融燃料排出機能とを小型、簡易な構造で実現しようとしたものである。克服すべきR&D要素はあるが、利点として炉心設計の自由度を制限せずに安全性を向上でき、また既存炉から将来の新型燃料炉まで適用範囲が広いため、実現されれば利用価値は高いものと考えられる。

---

\* 大洗工学センター安全工学部高速炉安全工学室

## Concept of a New SASS Providing Discharging Function of Molten Fuel

Hajime NIWA\*

### ABSTRACT

A new self-actuated shutdown system (SASS) was contrived for future FBRs. The characteristics of this device are as follows:

- has a geometry of fuel subassembly,
- can be transferred into the core by a normal fuel handling system,
- contains both fuel pin elements and neutron absorber elements, and
- provides a discharging path of molten fuel from the core in the event of fuel melting.

In this report the concept of this device will be explained and the feasibility of introducing to a large FBR will be discussed.

This device has two functions: a capability of self-actuated shutdown in a case of un-scrammed events, and a capability of molten fuel discharge in case of core disruptive accident (CDA). These functions correspond to the two levels of defense-in-depth philosophy if it is applied to CDA, i.e., prevention of core damage and mitigation of consequences. These functions of the device are realized in a small and compact geometry. Although there are several issues to be resolved through R&D, this device will be worthwhile because it has advantages to further improve a safety level without significantly affecting the core design itself, and to be adopted in any types of future FBR's including new fuel types.

---

\* O-arai Engineering Center, Safety Engineering Division, FBR Safety Engineering Section

## 目 次

1. 序 .....	1
2. 溶融燃料排出機能を備えた自己作動型炉停止装置の概念 .....	2
2. 1 従来のSASSの問題点 .....	2
2. 2 問題点の改善の目的 .....	2
2. 3 本装置の構成 .....	3
2. 3. 1 問題点を解決するための手段 .....	3
2. 3. 2 本装置の作用 .....	3
2. 3. 3 本装置の動作の詳細 .....	4
2. 4 本装置の効果に関する考察 .....	6
3. 集合体内蔵SASSの成立性評価に関する考察 .....	8
3. 1 概要 .....	8
3. 2 Y91基底増殖炉心への集合体内蔵SASSの装荷 .....	8
3. 3 本装置装荷による反応度欠損の評価 .....	9
3. 4 炉停止性能の評価 .....	10
3. 5 炉心溶融時の燃料排出による未臨界達成可能性の検討 .....	11
4. まとめと今後の課題 .....	13
参考文献 .....	14
付録-1 簡易説明用資料 .....	25

## 1. 序

通常の燃料交換機によって炉心内に装荷することができる集合体形状を持ち、燃料ピン束を内蔵し、かつ炉心損傷時には溶融燃料を炉心外へ排出する経路を備えた自己作動型炉停止装置を考案した。本装置は深層防護の考え方における2つのレベル、即ち炉心損傷事故の拡大防止と影響緩和とに対応させて、原子炉停止失敗事故時の自己作動型炉停止機能と、炉心損傷事故時再臨界回避用の溶融燃料排出機能とを小型、簡易な構造で実現しようとしたものである。後述のように、感熱式落下機構や溶融燃料排出機構等にR&D要素はあるが、利点として炉心設計の自由度を制限せずに安全性を向上でき、また既存炉から将来の新型燃料炉まで適用範囲が広いため、実現されれば利用価値は高いものと考えられる。

本報告では、第2章で本装置の概念を示し、第3章においてはその成立性評価の一環として、本装置を実機に導入した場合の反応度欠損などを見積もった。第4章には、まとめと今後の課題を示す。

## 2. 溶融燃料排出機能を備えた自己作動型炉停止装置の概念

### 2. 1 従来のSASSの問題点

従来のキュリー一点方式による自己作動型炉停止装置は、感熱部の位置が燃料発熱部から遠いため異常発生から作動までの所要時間が長い、高温冷却材を誘導するための流路が必要となる、既存の主炉停止系もしくは後備炉停止系に設置するために挿入機構に関して多様性が確保できない、等の問題があった。また、原子炉停止に失敗して炉心損傷事故に進展した場合、従来の制御棒では案内管内に冷却材が存在するために溶融燃料による案内管の溶融貫通に時間を要し、また駆動軸、ダッシュポット等の構造があるために炉心外への燃料流出が妨げられるとの問題があり、このため炉心内で溶融燃料の凝集が生じた場合には再臨界過出力が発生して多大なエネルギーが発生する可能性があった。他方、このような事故への進展を抑制するために炉心設計において中性子漏洩増加、線出力低減等の炉心性能の低下を甘受するような経済性を犠牲とした方策が考えられていた。

### 2. 2 問題点の改善の目的

本発明により、上記従来技術の問題点が改善され、以下の目的達成が可能となる。

- 1) 異常発生から炉停止装置作動までの所要時間の短縮
- 2) 中性子吸収材挿入機構の多様性確保とこれによる信頼性向上
- 3) 高温冷却材誘導流路不要化による簡易化、小型化
- 4) 炉心損傷事故時の炉心外への燃料排出による再臨界発生防止または緩和

5) 以上を集合体内に収納される簡易な構造で達成することによる経済性向上

## 2. 3 本装置の構成

### 2. 3. 1 問題点を解決するための手段

前記の目的を達成するために、本発明では例えば図1に示すように、通常の燃料集合体の形状ではあるが、燃料ピン本数を例えば半分程度に減じることにより、自己作動型炉停止装置①を内蔵させる。同装置部①は内部上方にある中性子吸収体②、感熱式の中性子吸収体落下機構③、炉心部下端にある仕切り板④、中性子吸収体落下部⑤よりなる管状の構造であり、燃料ピン東部出口から感熱機構位置③までの距離の短縮（数cm以下とできる）による応答時間の短縮、簡易化、小型化が可能となる。中性子吸収体の構造は任意であるが、既存原子炉停止系とは多様性を持たせるために小球状、短棒状等の形状が考えられる。構造壁⑥は、図2に示すように、炉心が損傷した場合に溶融燃料がこれを溶融貫通し易いものとし、かつ集合体の入口、出口にまで達する構造とすることにより、水力等価直径として燃料ピン東部や集合体間ギャップ部（3～5mm）と比較して1桁以上大きな値（数cmから10cm）を持つ燃料排出経路を備える。このような集合体を原子炉停止に十分な反応度価値を与えられる個数だけ炉心内に配置する。

### 2. 3. 2 本装置の作用

高速炉におけるATWS事故（Anticipated Transient without Scram 事故：原子炉停止失敗を伴う事故であり、1次系ポンプトリップによる流量喪失型や制御棒誤引抜きによる出力上昇型がある。）時には発熱と除熱のアンバランスが生じるが、発熱に対して除熱が



不足する場合は事故としては厳しい。この場合には炉心出口冷却材温度の上昇が生ずる。本発明では、この高温化した冷却材が燃料ピン東部を出て直ちに感熱位置図1③に達することにより落下機構が働き、中性子吸収体②を中性子吸収体落下部⑤へ落下させ、原子炉停止を達成することができる。また、万一炉心が損傷した場合にも、図2に示すように溶融燃料が構造壁⑥を溶融貫通することにより、下方、及び既に中性子吸収体が落下している場合（図2はこの状態に相当する）には上方へも燃料が排出される。これによる炉心内燃料質量の減少により、たとえ全炉心規模へ炉心内溶融燃料プールが拡大した場合でも、燃料の凝集による再臨界の発生を防止もしくは緩和できる。

### 2. 3. 3 本装置の動作の詳細

燃料集合体内部に設置される本装置部①の構造は、不活性ガスを内封した密閉構造、もしくはその上で減圧した密閉構造とすることによって、感熱機構の応答性が向上し、中性子吸収体落下時の流動抵抗も小さくなり、炉心損傷事故時の炉心外への燃料排出をより有効に促進でき、また、流路閉塞の原因となり得る異物発生を防止できる。冷却材が内部を貫流する構造であっても、微小の流量であれば可能と考えられる。

燃料集合体内への設置方法としては、軸線を中心とする円形断面または正多角形断面等、逆に燃料ピン束を内側におく環状形状、あるいは径方向に偏心させたもの等が考えられる。同構造は集合体の入口及び出口にまで達する構造として、図2に示すように、炉心部からはもとより、集合体外への燃料排出を可能とする。

燃料ピンの構造としては、上部ブランケットを有しない構造とした方が、燃料ピン東部を出た高温冷却材が直ちに感熱位置③へ達することができるので有効である。また、下部ブランケット部を有しない構造とした方が、ピン東部下方への溶融侵食によって溶融燃料の排出経路を提供し得る点で有利となる。

上述の通り中性子吸収体の形状・構造は任意であるが、小球状、短棒状等とした方が、

挿入機構に関して、制御棒を挿入するとの既存方式に対して多様性確保の点で有利である。また、中性子吸収体収納部②を落下部⑤に対して加圧しておくことで中性子吸収体の落下速度を速め、挿入を確実にする方法も考えられる。

感熱式落下機構③には金属の溶融あるいは融点近接による強度低下を利用する融点方式や、物質の熱膨張差を利用する方式等が考えられる。図3に融点方式の感熱式落下機構の例を示す。同例は、蝶番の心棒を共有する2枚の蓋（蓋A、蓋B）と、通常はこの蓋を支持している支持台、及びその支持台を支える固定台より成る。蝶番の心棒は炉停止装置部内管に固定された2つの支持板上に、その変形を避けるために両端を緩く支持されている。蓋Aと蓋Bは各々独立に開くことができる。通常時には各蓋は支持台によって閉位置に保持されている。支持台は内管壁及びその下にある固定台にろう付けされている。固定台はスチール製であり、蓋の開動作を阻害しない位置に内管に溶接されていて、支持台を介して中性子吸収体の重量を支えている。ナトリウム温度が上昇する事故時には、ろう付け部の温度が上昇し、強度低下・剥離により支持台が脱落して蓋が開く。支持台の材質はスチールとしてもよく、またろう付け用のろうと同じ材質の金属としてもよい。後者の場合にはナトリウム昇温時には支持台自身の強度低下・変形によっても蓋が開く。ろう付け用もしくは支持台自身にも用いる材料としては、ナトリウムの沸点（900℃以上）以下で融点近接による強度低下が生じることが必要であり、例えば金ろう（種類により固相線温度は700℃から900℃の間にある）、銀ろう（種類により固相線温度は600℃から800℃の間にある）を考慮することができる。

各蓋に対して支持台を複数（例えば3つ）設置することにより、1つの支持台の脱落によっては蓋は開かず、よってろう付け不良等による誤落下の可能性を低減できる。また蓋を複数（図3の例では2枚）設けることにより、事故発生時に内管変形等によるかじり等で開失敗が生じても、他の蓋が開くことによって、中性子吸収体の大部分は落下することができる。このためにも中性子吸収体は小球状又は短棒状であることが望ましい。

図4も融点方式による感熱式落下機構の例である。図3と似た構造であるが、蓋はフ

レキシブルな構造（例えばスチール製フォイルやメッシュ構造等）であり、中央部では蓋固定板に溶接され、内管壁側では内管に溶接された固定台に対して、易融金属製の固定用ピンにより固定されている。ナトリウム温度が上昇するような事故の場合には、内管壁と固定台の昇温に追従して固定用ピンの温度も上昇し、強度低下により脱落する。その際、蓋は中性子吸収体の重量によって下方へ変形して開き、中性子吸収体を落下させる。易融金属としては、例えば前述の金ろう、銀ろう等が考えられる。

本装置の炉心への装荷体数としては、本装置 1 体あたり既存の後備炉停止棒の 1 / 2 体程度の制御棒反応度価値をもたせることができるので、総数で後備炉停止棒本数の 2 倍程度となる。例えば 60 万 kW クラスの大型高速炉では 10 体から 20 体程度である。溶融燃料排出装置としては装荷体数は多いほど有効であるが、例えば本装置 1 体によって、隣接する 6 燃料集合体の燃料を早期に排出できるならば、大型炉では 12 体程度の装荷で燃料インベントリの 30% を排出できることとなり、再臨界の回避には十分である。

感熱式落下機構や中性子吸収体の炉内滞留許容時間に制約がある場合には、定期的な燃料交換の度に、通常の燃料交換機によって簡易に新規のものと交換することが可能である。本装置は 1 体の構造が単純であり、上記クラスの大型炉でも炉心内に 10 から 20 体程度の設置で有効となるため、頻繁に交換を行っても経済性を大きく損なうことはない。

## 2. 4 本装置導入による効果に関する考察

本装置の採用により、炉心性能を大幅に犠牲にするような炉心設計に依存することなく、高速炉の原子炉停止失敗事故時において炉心損傷への進展を防止することが経済的に達成できる。また炉心が損傷した場合でも、本装置の燃料排出経路を介した燃料排出によって、再臨界過出力の発生を防止もしくは抑制でき、事故影響の緩和が達成できる。

以上から、本装置の採用によって多層の安全機能を経済的に備えることができる。

本装置は、既存の高速炉プラントに対しても、また、酸化物燃料に限らず将来に予想されるいかなる新型燃料を用いた炉心に対しても、通常の燃料交換機によって簡易に装荷することが可能である。

### 3. 集合体内蔵SASSの成立性評価に関する考察

#### 3. 1 概要

本装置の成立性評価の一環として、同炉停止系をプラント工学室によるH3年度設計基底増殖炉心（Y91炉心、60万kWe）に対して、他の設計パラメータの変更無しに後備系本数（6体）の2倍の数（12体）を燃料集合体と置換して装荷した場合の反応度欠損を見積り、元の燃焼反応度欠損と比較した。その結果、本SASS 12体装荷による反応度欠損は燃焼欠損反応度の1/3以下に過ぎないと評価された。炉停止性能についても簡易評価を行い、十分な炉停止余裕を得られるとの見通しを得た。また、万一炉心溶融プールが生成した場合の、未臨界達成に必要となるSASS 1体当たりの燃料排出量についても検討し、概ね各SASS内燃料とこれに隣接する6体分の燃料が排出されること、と見積もられた。問題はそのような排出が想定時間内に可能か否かである。本報告は全て手持ちデータに基づく簡易な評価である。

#### 3. 2 Y91基底増殖炉心への集合体内蔵SASSの装荷

Y91基底増殖炉心は電気出力60万kW、増殖比1.05を狙った図5の構成を持つ炉心である<sup>1)</sup>。後備炉停止系は6体装備されている。

この炉心に対して、他の設計パラメータの変更を加えずに、集合体内蔵SASSを第3の炉停止系の位置付け（ただし安全系としてクレジットを取れるか否かについては議論の余地有り）で、後備炉停止系の2倍の本数、すなわち12体を装荷する事を考える。

評価の前提条件として、同SASSは1体当たりの燃料インベントリが通常の燃料集合

体の半分（ピン本数で217/2本）、制御棒としての1体当たりの反応度価値は、装荷位置、 $B_4C$ のインベントリ等が影響するはずだが、やはり後備系1体の半分とする。

Y91炉心に対する同SASSの装荷想定位置を図6に示す。多少変則的で1/3回転対称配置となっているが、これは炉心溶融発生後の排出促進を考慮して、極力炉心全域に分散配置することを意図したためである。（このようなSASSを導入する場合には炉設計へのフィードバックがあるので、もちろん、この配置がそのまま最適解となるわけではない。）

### 3. 3 本装置装荷による反応度欠損の評価

図6の12体の燃料集合体において、燃料インベントリが1/2となったことによる反応度欠損を評価する。ここでは、同炉心のSAS3D解析時に、その入力データ作成用にDIF3DS（Hex-Z 3次元拡散モデル）を用いて行った、同炉心内の各集合体における物質反応度価値の計算結果を利用して評価する。

図7はY91炉心解析に用いたSAS3D解析用のチャンネル配置図であり、図6の12体のSASSは、図7の上では、SASチャンネルのCh. 3, 4, 7, 9の各1体に対応している。

表1はDIF3DSで作成されたSAS3Dの入力となる物質反応度価値のサマリーテーブルであり、各SASチャンネルの燃料ワースは同表第2列に示されている。同表から、SASS装荷による反応度欠損は以下のように求められる。

SASチャンネル合計（6体）		SASS相等分欠損（3体）	
[ $\Delta k/kk'$ ] (Table 1)		燃料欠損は1.5体分[ $\Delta k/kk'$ ]	
Ch. 3	8.96420E-3	*1/4 =	2.24105E-3
Ch. 4	1.12796E-2	*1/4 =	2.81990E-3
Ch. 7	8.37193E-3	*1/4 =	2.09298E-3
Ch. 9	8.57854E-3	*1/4 =	2.14464E-3
		(合計) 9.29857E-3 [ $\Delta k/kk'$ ]	

即ちSASS装荷による反応度欠損は0.93 [%  $\Delta k/kk'$ ] である。

他方、燃焼欠損反応度は表 2 (Ref. 1) より、2.82 [%  $\Delta k/kk'$ ] であるから、SASS装荷による反応度欠損は燃焼欠損反応度の1/3に相当する。単純には、現在のところ1年と計画されている運転サイクル日数が、その2/3の8カ月程度となることを許容すれば、他の設計変更無しに本SASSを装荷することができることになる。

なお、実際には、本SASSは燃料交換の度に交換してそこには1/2体の新燃料を装荷することとすれば、反応度欠損は0.93%よりも小さくなると考えられる。

### 3. 4 炉停止性能の評価

炉停止性能については、3. 2で述べた前提に従えば、Y91炉心の後備系の炉停止性能の評価 (Ref. 1) と同様になる。即ち、以下のとおり。

表3にY91炉心の制御棒の必要反応度が示されている (Ref. 1より)。同表では後備系に対して、出力補償、事故時投入反応度、核計算不確かさ、を考慮して、1.64 [%  $\Delta k/kk'$ ] を必要反応度としている。

これに対して、Y91炉心で提案されている後備系は、表4に示す通り、ノミナル設計値で2.65 [%  $\Delta k/kk'$ ]、最小値で2.39 [%  $\Delta k/kk'$ ] の価値を持っており、全挿入時には炉停止余裕として0.75 [%  $\Delta k/kk'$ ] を残している。仮に本SASSを第3の炉停止系なみに扱うとしてワンロッドスタックを考慮すると、本SASSは12体あるので、最小値でもなお、

$$2.39 * (11/12) = 2.19 \text{ [% } \Delta k/kk' \text{]}$$

の価値を持つ (制御棒相互干渉効果の消滅による価値の増加は未考慮)。

よって、いずれにしても、炉停止性能としては十分であると考えられる。

### 3. 5 炉心溶融時の燃料排出による未臨界達成可能性の検討

大型炉では、炉心燃料インベントリの概略30%が炉心外へ排出されると、理想的な2次元スロッシングが生じたとしても、再臨界バーストのポテンシャルはほとんど消滅する。これはY91炉心では、

$$246 \text{ (体)} * 0.3 = 74 \text{ (体分の燃料)}$$

に相当する。もちろん起因過程における1次バーストによって何%かの燃料はUAB部へ浸入固化していると考えられるが、それらは再落下の可能性があるので、恒久的排出とは現状では認め難い。従って、これを本SASSのみを介して炉心外へ排出しようとする、SASS1体当たりの必要排出量は、

$$74 / 12 = 6.2 \text{ (体分の燃料排出 / SASS 1体)}$$

となる。これは概ね、SASS内の0.5体分の燃料とSASSに隣接する6体の全燃料に相当している。

#### 問題

ここでの問題は、溶融炉心プールが拡大していく数秒から数十秒の時間オーダーの間に、SASSの広い流路断面を介して下方もしくは上方へそれだけの燃料が排出し得るのか、し得ないならば、どのような形状であれば排出が可能か、あるいはSASSの体数を増やさねばこれだけのインベントリの排出は不可能なのか、という処へ帰着される。

しかしもしこれだけ大きな流路が確保されているにも係わらず排出ができない、との



見通しであれば、元々これよりも小さな等価水力直径を持つ制御棒案内管（ダッシュポットが存在するため）、ピンバンドル部、集合体間ギャップ等を介しての排出などは望むべくもない。よって、現在の見通しであるところの燃料排出による未臨界達成とのシナリオは捨てざるを得ないことになる。

#### 4. まとめと今後の課題

通常の燃料交換機によって炉心内に装荷することができる集合体形状を持ち、燃料ピン束を内蔵し、かつ炉心損傷時には熔融燃料を炉心外へ排出する経路を備えた自己作動型炉停止装置を考案した。本装置は深層防護の考え方における2つのレベル、即ち炉心損傷事故の拡大防止と影響緩和とに対応させて、原子炉停止失敗事故時の自己作動型炉停止機能と、炉心損傷事故時再臨界回避用の熔融燃料排出機能とを小型、簡易な構造で実現しようとしたものである。高速炉の安全性水準向上に対するこのような装置の有効性については別途検討されており<sup>2)</sup>、高い評価を得ている。

本装置の成立性評価の一環として、同炉停止系をプラント工学室によるH3年度設計基底増殖炉心（Y91炉心、60万kWe）に対して装荷した場合の反応度欠損を見積り、燃焼欠損反応度の1/3以下に過ぎないとの結果を得た。炉停止性能についても簡易評価を行い、十分な炉停止余裕を得られるとの見通しを得た。また、万一炉心熔融プールが生成した場合の、未臨界達成に必要となるSASS1体当たりの燃料排出量についても検討し、概ね各SASS内燃料とこれに隣接する6体分の燃料が排出されること、と見積もられた。

今後の検討課題として以下が挙げられる。

- －有効な感熱式落下機構の検討
- －燃料排出量と所要時間の評価

装置の試作や動作の実証は、これらの検討結果に基づいてその必要性を判断すべきであろう。

### 参考文献

- 1) 前田、林、丹羽、他、「平成4年度下期大型高速炉設計研究 ー成果報告会資料集 ー」、PNC PN9440 93-010、1993年6月
- 2) 丹羽、家田、「SERAPHに期待される役割に関する検討 ー実用化先導研究テーマに関する検討（I）ー」、PNC ZN9410 93-297、1993年11月

表1 Y91 炉心SAS3D解析用物質反応度価値 (DIF3DSより)

\*\*\*\* TOTAL WORTH (DELTA K) AND (\$) \*\*\*\*

CH.	FUEL (CURE)	VOID (CORE)	VOID (POSITIVE SUM)	CLAD (CORE)	AOP DELTA(K/K)	BOP DELTA(K/K)
1	2.08652E-02	1.51856E-03	1.53025E-03	-2.78873E-03	-8.56206E-04	-6.69013E-04
2	1.89684E-02	1.53709E-03	1.54851E-03	-2.78425E-03	-7.94472E-04	-6.22948E-04
3	8.96420E-03	8.22164E-04	8.27814E-04	-1.46129E-03	-3.57567E-04	-2.80983E-04
4	1.12796E-02	5.01368E-04	5.11662E-04	-1.00275E-03	-2.76854E-04	-1.99373E-04
5	1.43212E-02	1.04987E-03	1.05764E-03	-1.92610E-03	-5.94112E-04	-4.56843E-04
6	1.30133E-02	1.06252E-03	1.07028E-03	-1.92295E-03	-5.51083E-04	-4.25174E-04
7	8.37193E-03	7.67185E-04	7.72332E-04	-1.36320E-03	-3.31862E-04	-2.55998E-04
8	9.42961E-03	6.87383E-04	6.92747E-04	-1.25777E-03	-3.67947E-04	-2.78601E-04
9	8.57854E-03	6.97531E-04	7.02600E-04	-1.25666E-03	-3.40542E-04	-2.58793E-04
10	1.03108E-02	5.06824E-04	5.17831E-04	-9.97263E-04	-2.64323E-04	-1.90876E-04
11	9.97171E-03	4.23576E-04	4.34870E-04	-8.56070E-04	-2.43999E-04	-1.75015E-04
12	1.48797E-02	1.30402E-03	1.31566E-03	-2.33751E-03	-6.33441E-04	-4.83220E-04
13	1.26807E-02	8.85874E-04	8.98523E-04	-1.64580E-03	-5.10582E-04	-3.80584E-04
14	7.32148E-03	6.35446E-04	6.41855E-04	-1.15232E-03	-3.03981E-04	-2.27377E-04
15	1.14748E-02	9.04962E-04	9.14817E-04	-1.64763E-03	-4.68714E-04	-3.51198E-04
16	1.68194E-02	9.83814E-04	1.00145E-03	-1.89458E-03	-4.86658E-04	-3.53343E-04
17	9.15230E-03	4.39529E-04	4.48333E-04	-8.69310E-04	-2.33092E-04	-1.67655E-04
18	8.85998E-03	3.00662E-04	3.12927E-04	-6.45774E-04	-1.96977E-04	-1.41190E-04
19	4.44831E-03	1.31646E-04	1.39667E-04	-2.94685E-04	-9.67959E-05	-6.93437E-05
20	6.44790E-03	5.59063E-04	5.64312E-04	-1.01981E-03	-2.67411E-04	-1.97534E-04
21	8.17009E-03	2.30510E-04	2.45022E-04	-5.23832E-04	-1.77734E-04	-1.27782E-04
22	4.08984E-03	1.38757E-04	1.45215E-04	-3.01397E-04	-9.24297E-05	-6.65418E-05
23	1.58570E-02	5.52742E-04	5.76856E-04	-1.18944E-03	-3.61860E-04	-2.60059E-04
24	7.34003E-03	2.95988E-04	3.09508E-04	-6.23264E-04	-1.76902E-04	-1.27651E-04
25	1.16618E-02	3.49313E-04	3.73460E-04	-7.98453E-04	-2.71165E-04	-1.97212E-04
26	8.52567E-03	-2.92198E-05	2.00225E-05	-1.32042E-04	-2.08097E-04	-1.60179E-04
27	7.95452E-03	-2.47134E-05	2.21438E-05	-1.29748E-04	-1.97202E-04	-1.52101E-04
28	9.03946E-03	-7.45336E-05	2.15808E-06	-7.67543E-05	-2.33892E-04	-1.82910E-04
29	7.75573E-03	-1.25612E-04	0.00000E+00	5.66657E-05	-2.01805E-04	-1.61051E-04
30	7.77772E-03	-1.25874E-04	0.00000E+00	5.66586E-05	-2.02312E-04	-1.61363E-04
TOTAL	3.14331E-01	1.69064E-02	1.75985E-02	-3.27861E-02	-1.03000E-02	-7.78191E-03
(\$)	7.85621E+01	4.22550E+00	4.39846E+00	-8.19436E+00		

表2 出力分布と燃焼特性 (Y91 炉心, Ref1より)

核 特 性		H3年度炉心		(参考) H2年度炉心	
		高増殖炉心	基底増殖炉心	高増殖炉心	基底増殖炉心
運転サイクル長さ (日)		375	365	487	456
Pu富化度 (wt%) 内側炉心/外側炉心		17.12/20.85	17.01/21.05	15.26/20.14	15.95/20.93
最大線出力 (W/cm)	平衡初期	内側炉心/外側炉心 470.4/460.4		375.3/397.5	382.9/408.5
	平衡末期	内側炉心/外側炉心 442.4/434.0		391.9/342.6	408.7/352.4
燃焼欠損反応度 (%Δk/kk')		2.70	2.82	2.56	3.10
取出平均燃焼度 (MWd/t)		85,700	85,900	87,200	88,400
最大高速中性子束 (n/cm <sup>2</sup> -sec)		2.85 × 10 <sup>15</sup>	2.89 × 10 <sup>15</sup>	2.40 × 10 <sup>15</sup>	2.45 × 10 <sup>15</sup>
高速中性子照射量 (n/cm <sup>2</sup> )		2.77 × 10 <sup>23</sup>	2.73 × 10 <sup>23</sup>	3.0 × 10 <sup>23</sup>	2.9 × 10 <sup>23</sup>
増殖比	平衡初期	1.243	1.045	1.212	1.020
	平衡末期	1.229	1.058	1.211	1.047
物質収支 (平衡炉心)	装荷Pu fissile量 (kg)	816	819	1027	1017
	取出Pu fissile量 (kg)	966	864	1209	1055
	取出/装荷重量比	1.184	1.055	1.177	1.037

表3 制御棒の必要反応度 (Y91 炉心, Ref1 より)

(単位 : %Δk/kk')

項目	主炉停止系
1. 出力挿償(200°C~定格)	1.20
2. 燃放挿償	2.82
3. 燃料交良余裕	0.10
4. 運転余裕	0.20
5. 核計算不確かさ挿償	0.68
(1)出力挿償予測誤差(2σ)	0.24
(2)燃料製作公差(2σ)	0.30
(3)燃放挿償予測誤差(2σ)	0.56
不確かさの処理法	統計
合計	5.00
6. 核計算不確かさ	0.53
(1)臨界性予測誤差(1σ)	0.44
(2)燃料製作公差(2σ)	0.30
不確かさの処理法	統計
必要反応度の最大値	5.53

項目	後備炉停止系
1. 出力挿償(200°C~定格)	1.20
2. 非故時投入反応度	0.20
3. 核計算不確かさ	0.24
(1)出力挿償予測誤差(2σ)	
必要反応度の最大値	1.64

表4 制御棒価値の評価 (Y91 炉心, Ref1 より)  
(基底増殖炉心)

項目	主炉停止系 (%Δk/kk')	後備系 (%Δk/kk')
<u>全数挿入時</u>		
● 3次元拡散計算値	9.29(7.88) <sup>*5</sup>	3.14(3.18) <sup>*5</sup>
● ノミナル設計値 <sup>*1</sup>	7.85	2.65
● 最小値 <sup>*2</sup>	7.07	2.39
<u>ワンドスタック時</u>		
● 3次元拡散計算値	7.82(6.85) <sup>*5</sup>	2.68(2.49) <sup>*5</sup>
● ノミナル設計値 <sup>*1</sup>	6.61	2.26
● 最小値 <sup>*2</sup>	5.95	2.03
必要反応度最大値	5.53(5.03) <sup>*5</sup>	1.64(1.35) <sup>*5</sup>
炉停止余裕	0.42 <sup>*3</sup>	0.75 <sup>*4</sup>

\*1 基準計算値×JUPITER実験解析に基づき各種補正(計0.845)

\*2 ノミナル計算値×設計予測誤差(±10%、2σレベル相当)

\*3 主炉停止系はワンドスタックに対する値である。

\*4 後備停止系は全挿入に対する値である。

\*5 ( )内にH2年基底増殖炉心(B10濃縮度は主炉停止系30%、後備炉停止系90%)の値を参考として示す。

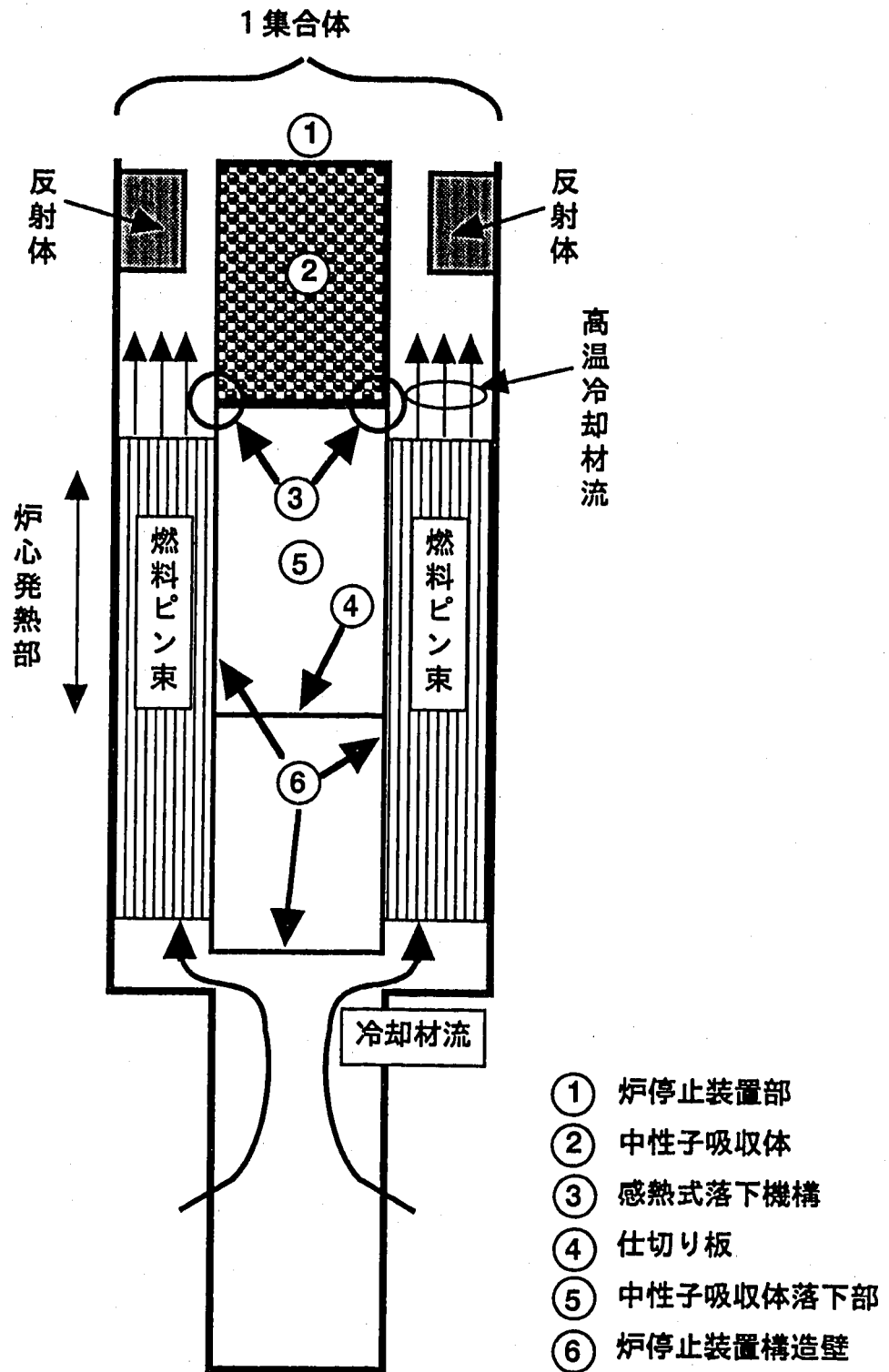


図1 事故時溶融燃料排出装置を兼ねた集合体内蔵自己作動型炉停止装置の概念の例

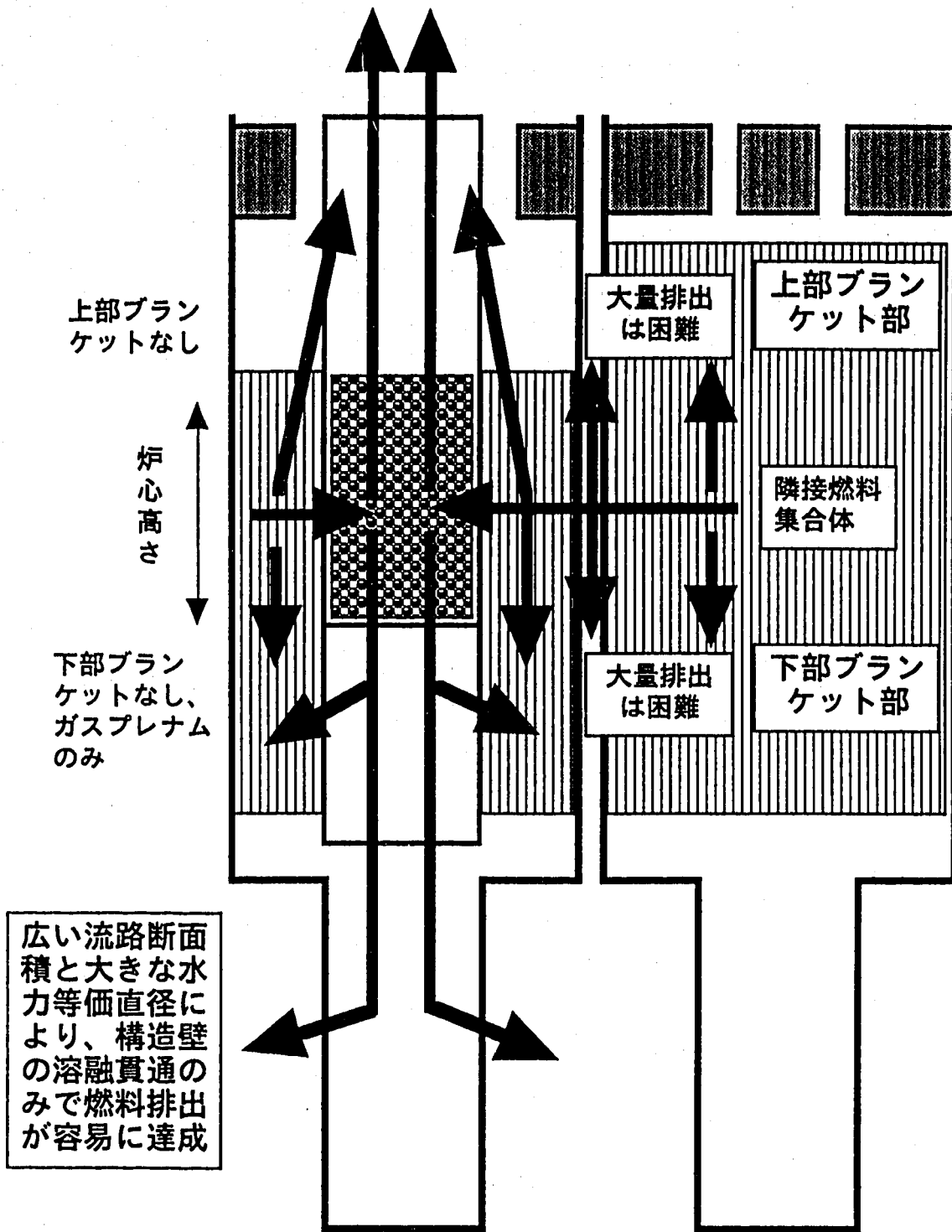


図2 炉心損傷事故時における溶融燃料排出経路の概念図

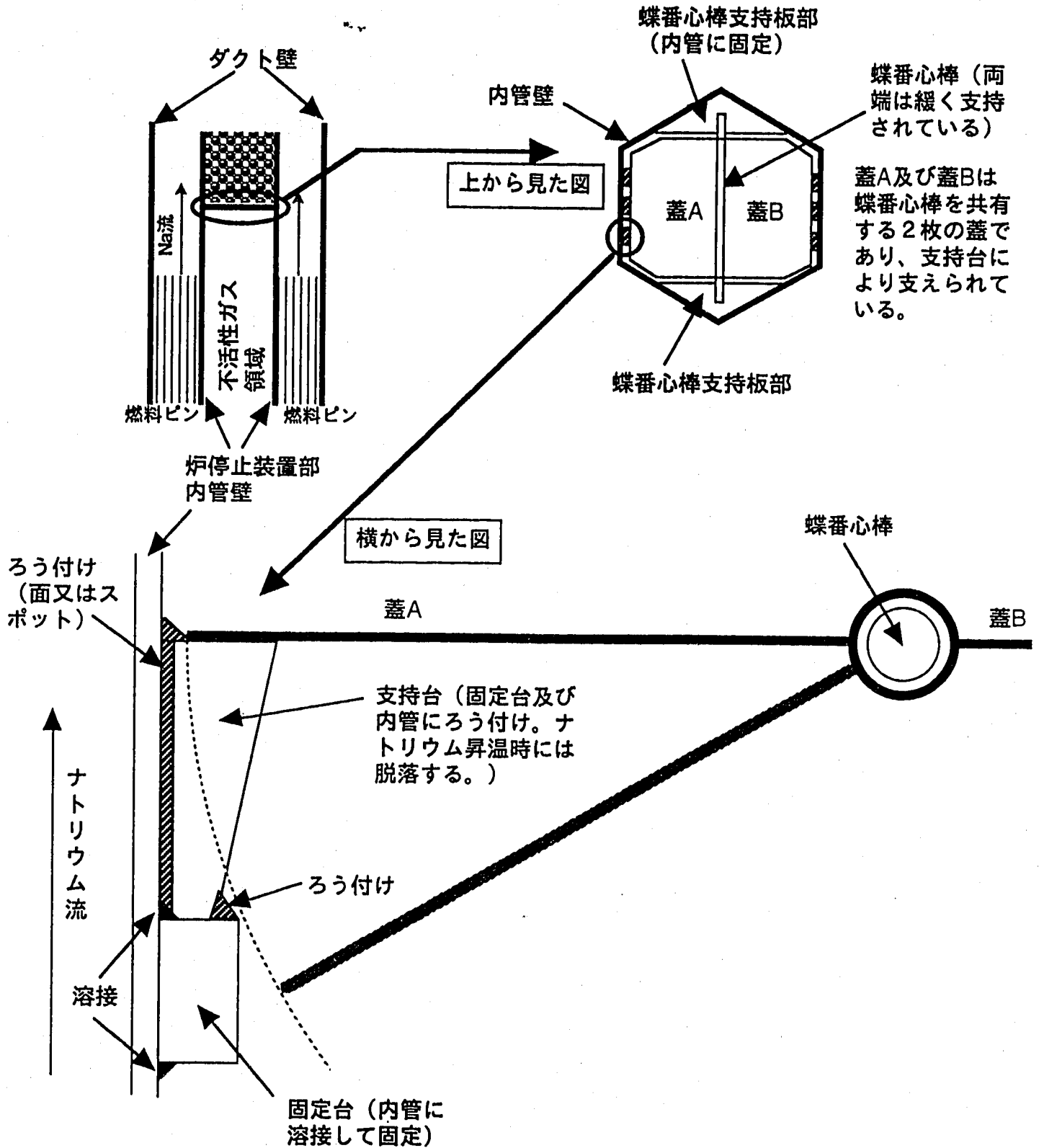


図3 融点方式による感熱式落下機構の例 (その1)



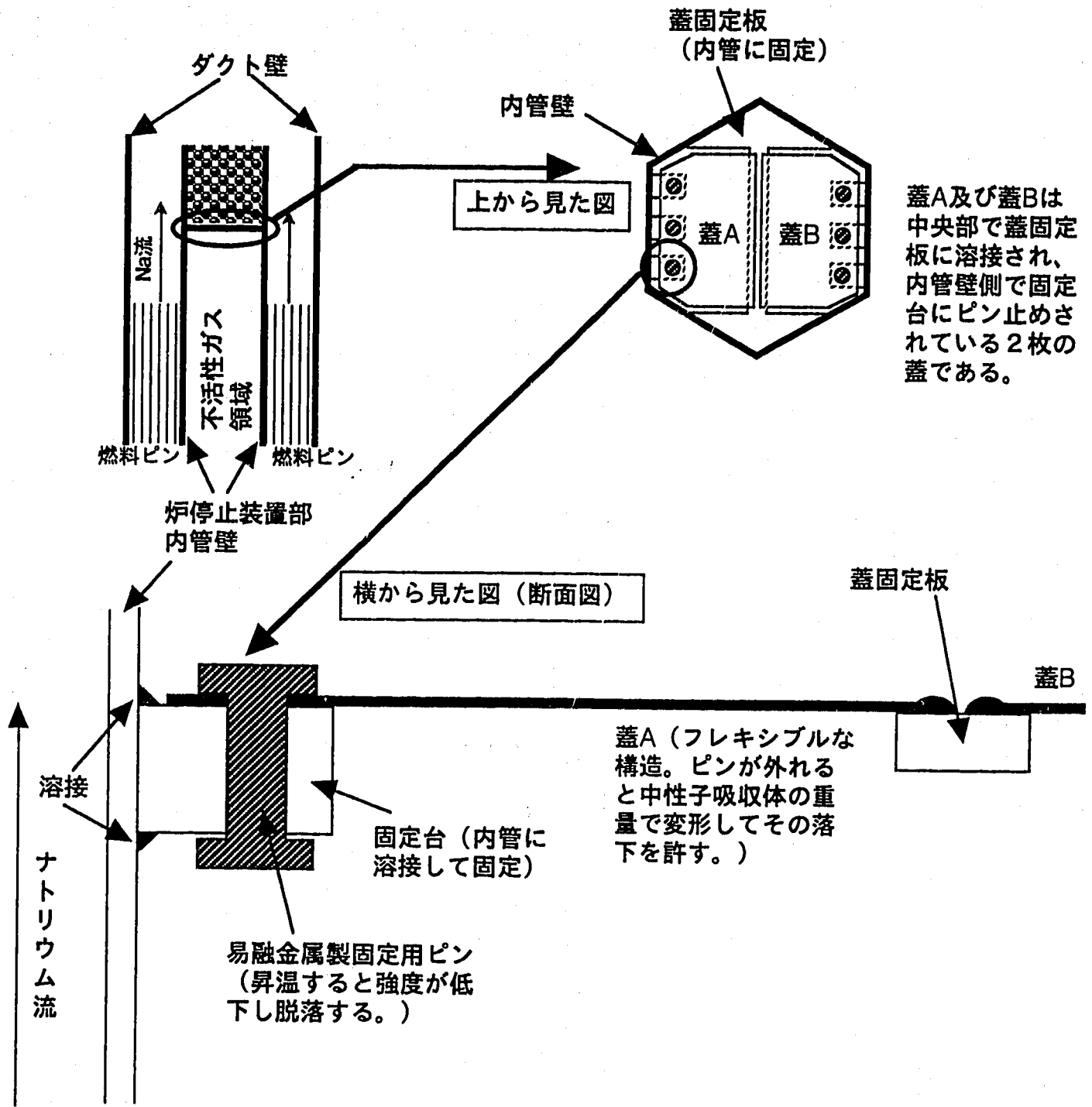
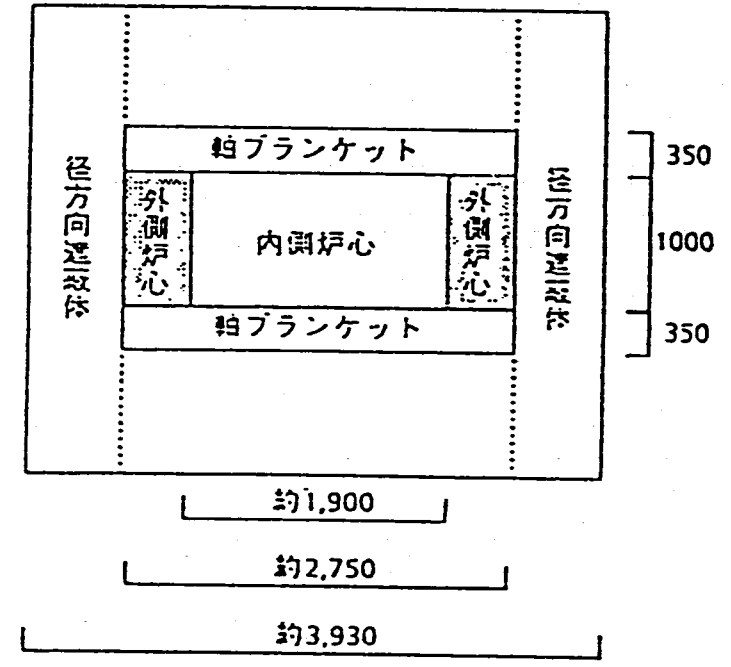
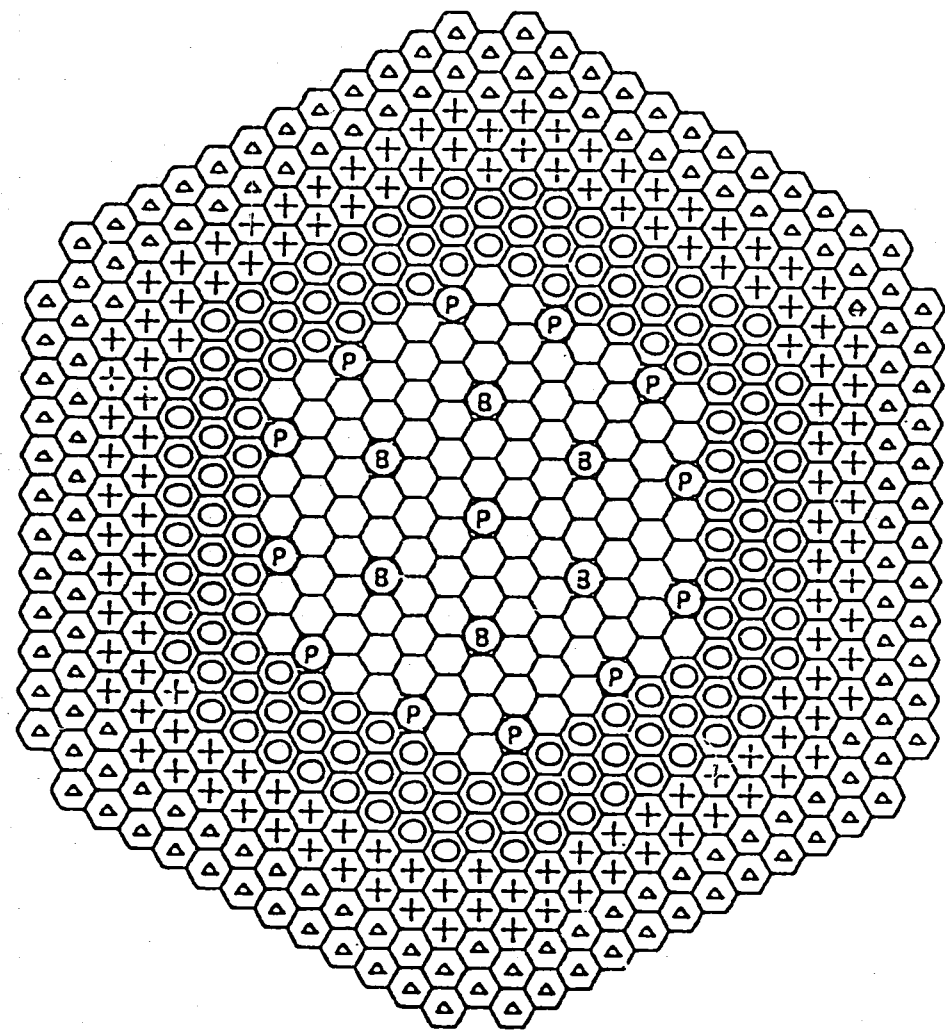


図4 融点方式による感熱式落下機構の例 (その2)

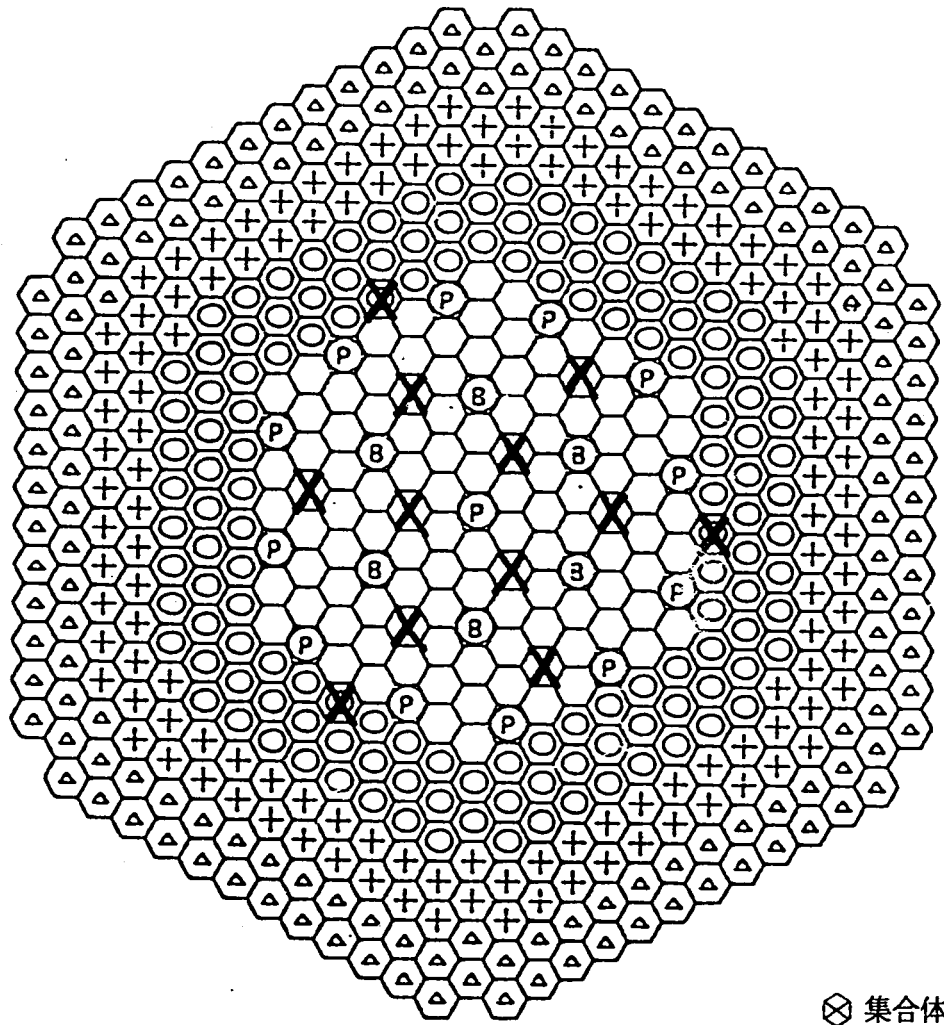


(等価直径(mm))

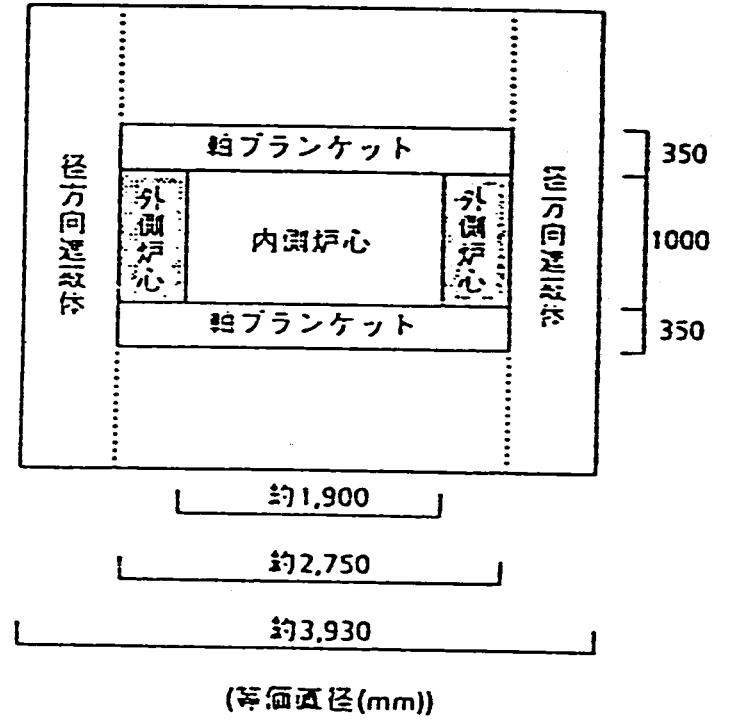
○	内側炉心	108体
⊙	外側炉心	138体
⊕	SUS遮蔽体	126体
△	B <sub>4</sub> C遮蔽体	150体
Ⓟ	主炉停止系制御棒	13体
Ⓟ	後備炉停止系制御棒	6体

合計 541体

図5 H3年度基底増殖炉心 炉心構成



⊗ 集合体内蔵 SASS  
 装荷想定位置 (12体)



- 内側炉心 108体
- ◎ 外側炉心 138体
- ⊕ SUS遮蔽体 126体
- △ B<sub>4</sub>C遮蔽体 150体
- Ⓟ 主炉停止系制御棒 13体
- Ⓟ 後備炉停止系制御棒 6体

合計 541体

図6 H3年度基底増殖炉心 炉心構成



付録一 1 簡易説明用資料

## 集合体内蔵自己作動型炉停止装置の概念 (要旨)

燃料集合体の内部に設置される自己作動型炉停止装置を考案した。本装置は、通常の燃料集合体の約1/2の本数のピンバンドル部と、バンドル直上に設置される球・短棒状等の中性子吸収体とその収納部、及び昇温したナトリウムに晒されることによって開く機構を有する蓋より成る（添付図参照）。複数体（大型炉で約20体、後備系本数の2倍弱程度）の本装置を炉内適所に配置することによって、通常の炉停止系の作動失敗を想定するATWS時の場合でも、本装置はピンバンドル部より流出する高温ナトリウムによって収納部蓋が開き、内部の中性子吸収体が炉心部へ落下することによって、核的炉停止を達成するものである。本装置は以下のような特長を有する。

- (1) 感熱動作点が燃料発熱部に近いため、高温Naの想定流路が、いわゆるキュリー一点落下型SASSよりも短く、応答が速い。
- (2) 構成要素数が少なく、構造が単純であり、かつ集合体内部に限られるために小規模な試作、試験が極めて容易。炉内試験もキュリー一点落下型SASSより容易。
- (3) 動作原理が単純であり、理解し易い。疑問の入る余地が無い。
- (4) 従来の主系、後備系の動作機構に対して多様性が確保できる。
- (5) 既存の炉への後付け的装荷が可能。（サイクル日数短縮等の調整は必要だが。）

更に、本装置の早期の動作が失敗して炉心崩壊に進展する場合でも、その構造から、以下のような利点、事象の緩和、終息効果が期待できる。又、遅延動作は常時期待でき、再臨界ポテンシャルの低減に有効である。

- (6) 本装置の出力流量比を大きくとることによりATWS起因過程において先行的に破損、燃料移動が生じる集合体と設定でき、内管（又は仕切り板）の溶融を以て広い流路断面での分散、負反応度挿入が期待できる。（ただし燃焼サイクル毎に交換して出力流量比を常に高く保つ必要あり。再処理は考慮しない→ブランクット無し）
- (7) 遷移過程においては上下に通じた広い流路断面積（水力等価直径）によって燃料の排出経路として期待できる。再臨界回避のための安全研究の狙いを絞れる。
- (8) PAMRでは下方への早期の燃料放出経路として特定でき、シナリオの確度が向上する。安全研究の狙いを絞れる。

なお、炉停止成功+除熱失敗型事象における下記のような利点もある。

- (9) LOHRSの炉心崩壊過程においても、大型炉では崩落による反応度挿入が小さいために主・後備系の挿入のみで再臨界回避の可能性が有り得るが（確率～0.5）、本

炉停止装置の作動によって未臨界度が深まり、「再臨界無し」をメインシナリオとすることができる。

上記の長所に対して以下のような欠点もあるが、許容もしくは克服可能と考える。

(10) 事故、又は異常な過渡の中でも厳しい側の事象程度で作動する事は十分に許容でき、かつ本装置の健全性を確認する上でも望ましいが、正常時に誤作動した場合には集合体ごと交換が必要となる。よって感熱開機構の高信頼度化が必要であり、鍵である。

このような装置を実用炉の設計に採用することによって、実用炉の開発上、以下のような利点が期待できる。

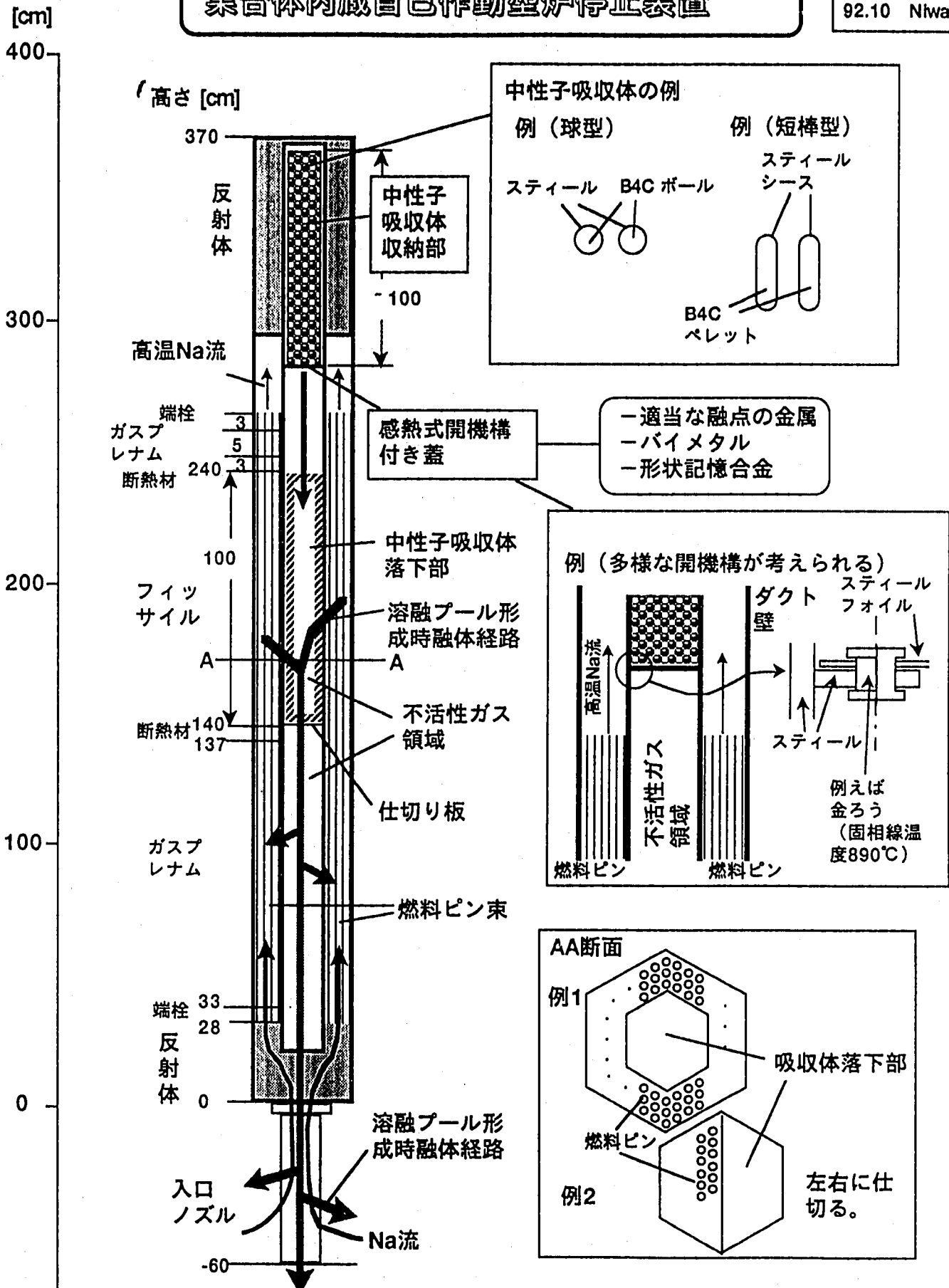
- (11) ATWS時の炉停止に係わる受動的安全性の達成を、現状では不確かさの大きいと考えられる炉心からの反応度フィードバックに依存する必要がなくなり、炉心設計の自由度が高められる。(ボイド反応度が数\$以下、という比較的緩い制約の中で、高性能化を狙える。)
- (12) 本装置を既存の主系、後備系に加えられる第3の炉停止系と位置付けることによって、ATWS事象を許認可で評価を要求されるいわゆる(5)項事象(設計基準外事象)から排除するための根拠とし得る。(ATWSはリスク評価/PSAの中で考慮される。)
- (13) 本装置は炉心溶融時の再臨界可能性低減効果を併せ持つため、「炉停止できるから、炉心溶融は考える必要ない、考えたくない」とのutilityの消極的議論に対して、「考えたとしても大丈夫」との深層防護の考え方に立脚した積極的なリスク低減議論を展開する根拠とし得る。(以て規制側の責務を全うし得る。)
- (14) ATWSの事象推移研究においては、実用炉の設計が定まらない現在の状況下で、考え得る事象推移の全スペクトルを再臨界プールを含めて潰すことを指向し続けるのではなく、炉心外への燃料排出とのサクセスシナリオの完成に優先順位を与えて研究開発を計画することができる。本装置の設計には未だ自由度があるため、排出を保証し得る本装置の設計の提案や、装荷本数の設定、という課題設定が可能である。(ATWSによるエネルギー発生を、機構論的に排除することを狙う。本装置は集合体規模であるため、その程度の試験孔を持つ炉内試験施設によって、確証に近い試験が可能である。)

上述の通り本装置は設計と安全研究との接点として最適化されねばならない。(炉心性能上は本数低減が好ましく、炉心溶融時の燃料排出との観点では本数増加が望ましいため。)しかし何よりも先ず、設計研究側、安全研究側(この様に分ける事に問題あるかもしれないが)両者によるこのような装置の成立性の議論を通して、実用炉のイメージがより鮮明にされ、実用炉炉心の安全性が設計段階から考慮されるようになることを望む。

(以上)

# 集合体内蔵自己作動型炉停止装置

92.10 Niwa



このようなSASSを炉内に12体程度装荷し、後備系程度の炉停止能力を持たせる。集合体形状は91年度設計(60万kW<sub>e</sub>)に準拠した。