

# 大型炉反応度制御系の検討

液体ポイズン制御管による制御

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor  
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-  
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

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

# 大型炉反応度制御系の検討

## 液体ポイズン制御管による制御

若 林 利 男<sup>○</sup>, 福 田 研 二<sup>○</sup>  
飯 島 一 敬<sup>○</sup>, 菅 原 悟<sup>○</sup>  
速 水 義 孝<sup>○</sup>, 宮 脇 良 夫<sup>○</sup>

### 要 旨

原子炉制御のための液体ポイズン管としては、イギリスの SGHWR の急速停止系、カナダの CANDU-PHW の領域制御系に使われている。

今回の大型炉反応度制御系の検討では、この液体ポイズン制御管を反応度制御系の主なものとして使用する場合の反応度制御特性、設計条件、設計に必要な R & D 項目等について検討をおこなった。

微・粗調整系用の液体ポイズン管として2重管構造のものを使用し、ポイズン管内の液面制御をおこなえば、固体制御棒と同じ程度に制御可能であることが認められた。また安全系の急速停止用ポイズン管についても、微・粗調整系に用いたものと同じ構造のポイズン管で十分であり、かつ注入に必要なポイズンを貯蔵しておくヘッドタンクも高圧に加圧する必要がないことが認められた。

今後の液体ポイズン制御管系の設計は R & D により特性および信頼性を確認しつつおこなわれる予定である。

Study of Reactor Control System for Commercial Fugen  
Liquid Poison Control Tube

T.Wakabayashi (株), K.Fukuda (株), K.Iijima (株)  
S.Sugawara (株), Y.Hayamizu (株), and  
Y.Miyawaki (株)

Abstract

Liquid poison tube has been used for the fast shut-down system of reactor in the SGHWR and the zone control in the CANDU-PHW.

In the present study of reactor control system for Commercial Fugen, reactor control system using liquid poison tube was investigated from the view points of reactivity control, design and development.

The fine and coarse reactivity control can be achieved with liquid poison level in double tubes similar to reactivity control by control rod system. Also, the fast shut-down of reactor is achieved with the same double tube in the fine and coarse reactivity control system without high-pressure head tank.

Design evaluation of this system will be further discussed with development necessary for confirmation reliability and performance characteristics.

## 目 次

1	序 論	1
2	種々の重水炉における反応度制御方式	2
3	ポイズン管の使用例	3
3.1	炉急速停止用ポイズン管	3
3.2	Light Water Zone Control System	4
4	ポイズン管の条件	5
4.1	設計基準	5
4.2	ポイズン管の設計条件	11
5	検討結果	14
6	結 論	27
	参考文献	28
	付録1 ポイズン溶解度温度依存性	29
	付録2 各制御量に対するポイズン管の諸元	29
	付録3 ポイズン管の炉心内配置	30
	付録4 微・粗調整系ポイズン管ワース曲線	32
	付録5 ポイズン管系統概略図例	33

## List of Tables

Table 1	Reactivity Control System for various Heavy-Water Reactors	2
Table 2	Design Basis for Reactivity Control System	10
Table 3	Design Study of Poison Tube	15

## List of Figures

Fig. 1	Typical Fluid Shutdown Loop	4
Fig. 2	Zone Control Absorbers	6
Fig. 3	Zone Control and Flux Detector Rods	7
Fig. 4	Simplified Flow Sheet for Zone Control System	8

# 1 序 論

圧力管型重水炉は冷却材と減速材とが圧力管を介して分離されており減速材自体は低温、低圧に保たれている。従って、液体ポイズン制御管（以下ポイズン管と略す）を比較的容易に減速材中に設置可能である。

ポイズン管を最大限利用し制御棒を全く無くすることができれば、炉の設計上のメリットとして次のことが考えられる。

「ふげん」では制御棒案内管およびその駆動機構のために炉心上部スペースの多くが占められているが、制御棒を無くすことによりこのスペースを有効に利用できる。

STEP IIにおいて進められている「大型炉」では制御棒は炉心下部より挿入することが考えられているが、これを無くすることにより炉心重心を低くする事が可能である。

又、制御棒は燃焼と共に制御能力が落ち、その補正が必要であり、最終的には交換しなければならず、交換の場合の被曝も問題となる。これに対してポイズン管の場合は濃度を一定にするだけで制御能力の補正又は交換の必要はない。

大型炉において制御棒を全くなくし、ポイズン管により代替させ、反応度制御を行うことの可能性について検討する。

## 2 種々の重水炉における反応度制御方式

各国の代表的重水炉における反応度制御方式はTable 1の通りである。カナダにおいては初期の炉（Gentilly-1, Douglas point）では重水水位による反応度制御を、オンパワー燃料交換制御棒方式とともに併用している。一方、最近の炉（Pickering）<sup>(1)</sup>では重水水位制御はむしろ補助的なものとし、軽水を吸収材として利用した反応度制御方式（一種のポイズン管と考えられる）を採用した。いずれの炉も新燃料装荷時の余剰反応度抑制や、Xe オーバライドのために減速材中のボロン濃度を調整している。また重水ダンプを炉停止のために行う。

英国SGHWR<sup>(2)</sup>においては制御棒を全く使用せず重水水位制御を主として用いており、ポイズン管により炉の緊急停止を行う等の点ユニークである。また商業SGHWRはこれにポイズン管による反応度制御方式をつけ加えているので結果的に今報告で指向している方式に極めてよく似ている。

いづれにせよ、カナダや英国においてはポイズン管をより広範囲に使用しようとする傾向がある。

Table 1 Reactivity Control System for various Heavy-Water Reactors

炉型	Douglas Point		Pickering	Gentilly-1	Gentilly-2	SGHWR	Commercial SGHWR	ふげん
	出力調整	出力分布調整						
微調整系	重水水位	制御棒	制御棒 軽水管	制御棒	制御棒	重水水位	重水水位 ポイズン管	制御棒
	起動及び停止	重水水位 ブースタ	制御棒	重水水位 ブースタ	制御棒	重水中ポイズン	重水中ポイズン	制御棒
粗調整系	燃焼反応度補償	重水中ポイズン	重水中ポイズン	重水中ポイズン	重水中ポイズン	重水中ポイズン	重水中ポイズン	重水中ポイズン
	急速停止系		制御棒	重水中ポイズン	制御棒 ポイズン管	ポイズン管	ポイズン管 重水ダンブ	制御棒
安全系	低速停止系	重水ダンブ	重水ダンブ	重水ダンブ		重水ダンブ		重水ダンブ



### 3 ポイズン管の使用例

#### 3.1 炉急速停止用ポイズン管<sup>(2)</sup> (SGHWR)

SGHWRでは、炉心上部スペースの制約から、制御棒による炉停止は考えなかった。また、重水ダンプによる方式は応答性の点で問題があり採用しなかった。

重水中へのポイズン直接注入方式は、重水中へのポイズンの分布、重水の精製の点で難点がある。ポイズン管内、常に水を流しておき、必要なときに、これにポロンを注入する方式は、流水が軽水の場合中性子経済の点で、又、重水の場合重水インベントリが増大することで問題がある。また、流水は高流速である必要があり動力の点で難点がある。

更に、重水中へのポイズン直接注入にせよ、ポイズン管内でのポロン注入にせよ、注入後、再起動する際の付加的な clean up システムが必要である。

種々の案を比較評価して結局 Fig.1 の様な方式を採用することにした。

主として、U-tube、主炉停止弁、高圧のヘッドタンク、バッファタンクから構成される。カランドリアタンク内の管の材料は aluminum-magnesium(2.5~3%)合金、残りは 18-8-1 のステンレス鋼である。

ヘッドタンク内には、自重により control equipment room(CER)よりポイズン液が導かれ満たされる。CERには加圧器も設置されている。ドレンされた absorber は CER に再び導かれ再使用前検査を受ける。この回路には、純水がフラッシュされる様になっており、更に、回路内を乾かすために、低流速低圧にてヘリウムが purge されるようになっている。

急速注入を行うために 0.1 sec 内で開く弁を開発した。三方弁になっており一方向は、ドレン用に使用する。

この方式の採用において注意したことは炉停止弁 (shut-off valve) を運転中でもチェックすることができるようにしたこと、弁の繰返し機能の健全性を、valve test rig, full scale rig により確認したことなどである。

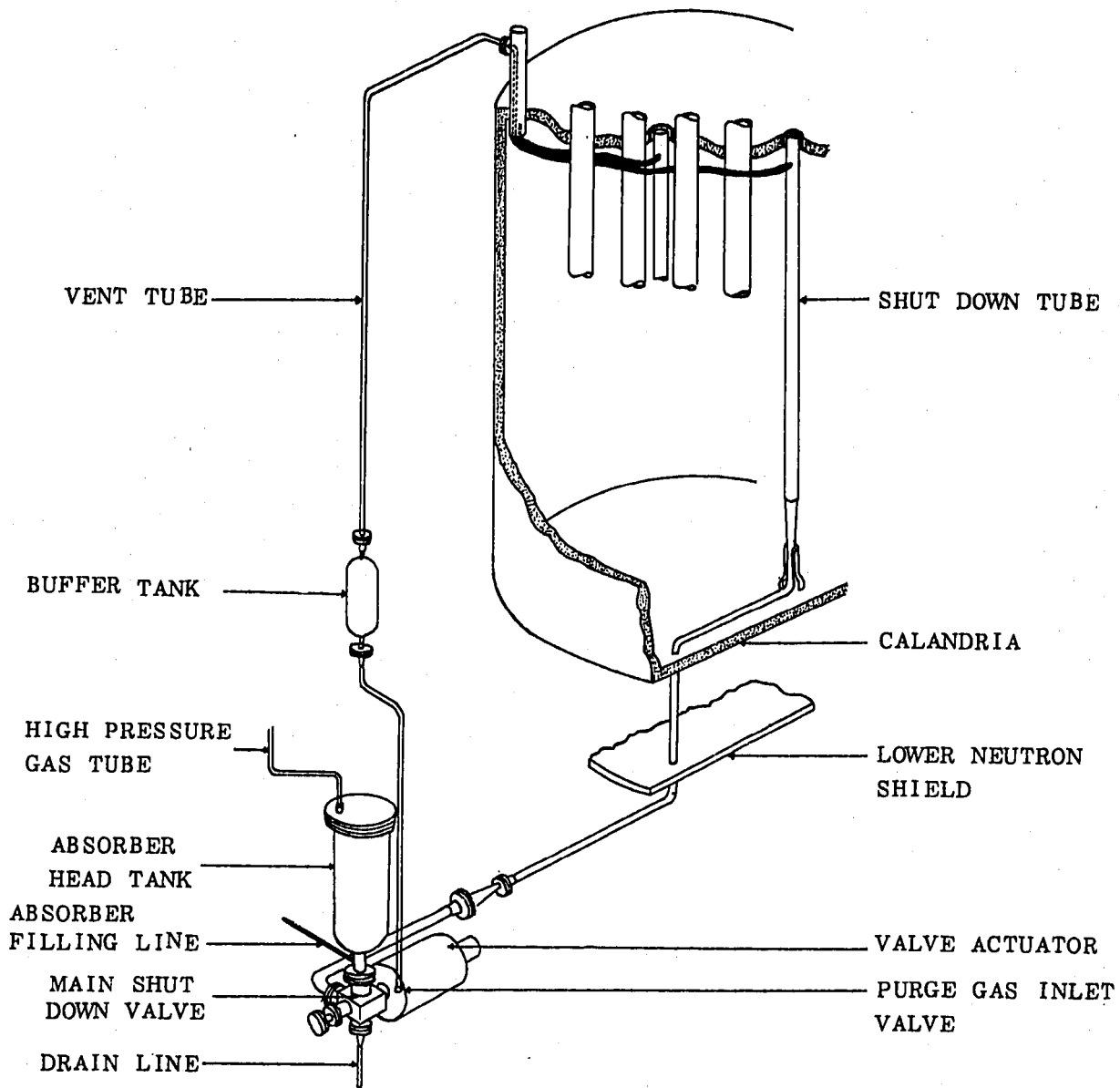


Fig.1: Typical Fluid Shutdown Loop

### 3.2 Light Water Zone Control System<sup>(1)</sup> (Pickering)

原子炉は、領域制御のために軸方向を2つに分け、おのおのは7領域に分割されている(合計14領域, Fig.2)。各領域の中心に, Zone control compartmentが位置し, これは, 各軸方向領域に3本ずつ計6本のZircaloy through-tubesに入っている。小口径の管により軽水が各 compartment内に流入され, 軽水水位が制御される。(Fig.3)

フィード管が各 compartment あたり4本ある。うち2本は, 軽水の給水, 排水用, 他の2本はカバーガスの給, 排ガス用であり, 軽水用管と同心になっている。これらによる反応度制御中は軽水水位の0~100%の変化により炉心力を0~100%変化される十分な程である。

フローシートをFig.4に示す。流出流量は, 定で各 compartment 下端より2 Igpm (Imperial gallons) 流出される。上端より流入する流量を $1/4 \sim 4$  Igpmの間で制御することにより軽水液位を制御する。軽水水位は gas bubbler methodにより検出し, 計算機により制御バルブを操作する。回路の中に delay tankを設け,  $O^{19}$ ,  $N^{16}$ 等の放射能を decayさせるので, 運転中においてでも弁, ポンプ, ブロー等には近づけるようになっている。

Pump supply pressure failure の場合, gas storage tank の base にためてあるシール水50 IgpmがFig.4のV1を開くことにより注入される。これにより pump に電源がなくとも1.8分間回路は作動する。supply header pressure failure の場合, return header V2が閉じ, 軽水水位の低下を防ぐ。

カバーガスには市販のヘリウムを用いる。水の純度を保つために, イオン交換塔が設けられている。これだけにより, カバーガス内に, 爆発性 $O_2$ ,  $H_2$ ガスが充満するのを防ぐことができるが, 用心のために再結合器も設けられている。NRUの運転経験から水素の発生は非常に少ないことがわかった。(1.5% vol/day)。カバーガスは定期的にサンプルを検査し,  $H_2$ ,  $O_2$  レベルを測定するようにしている。

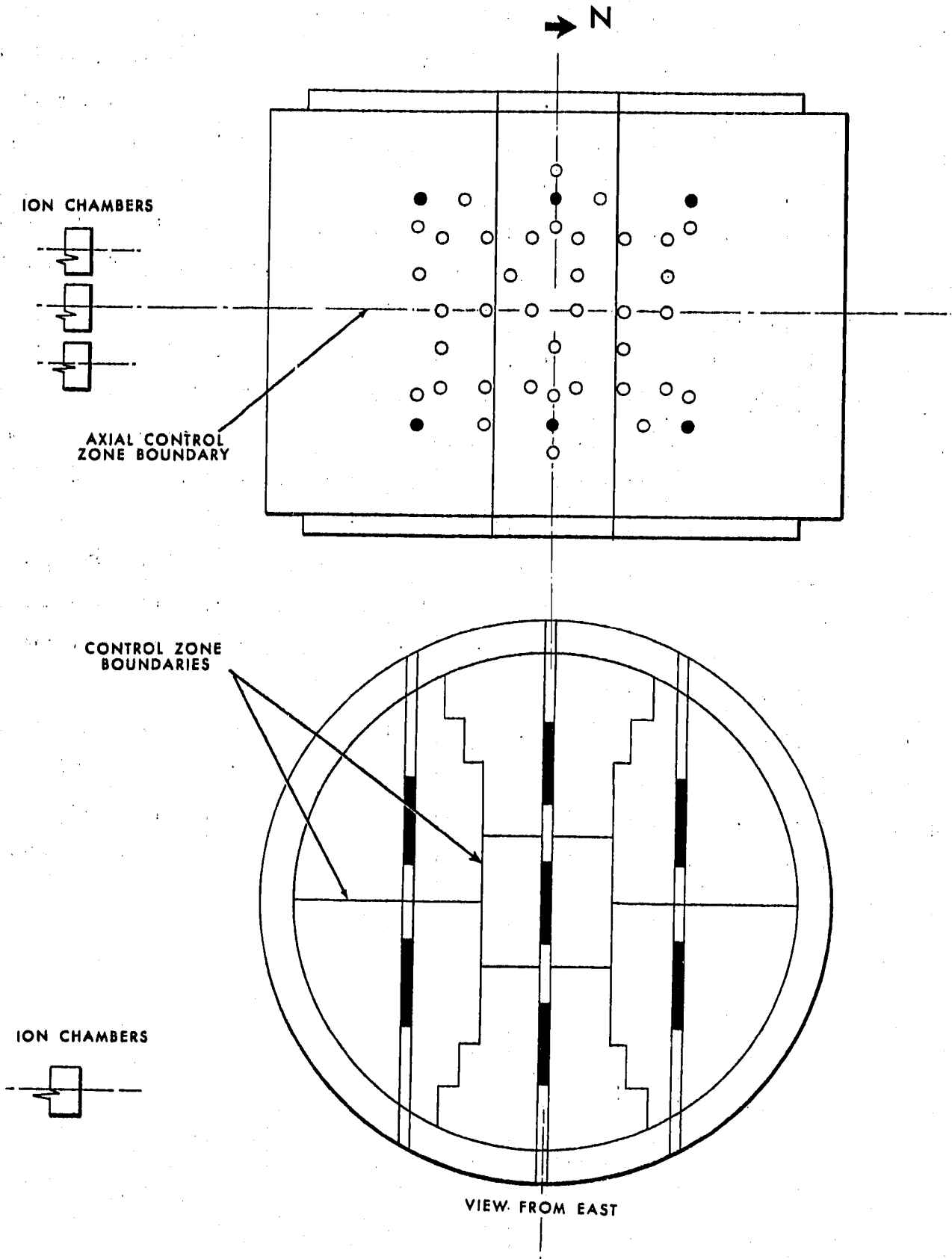


Fig.2 Zone Control Absorbers

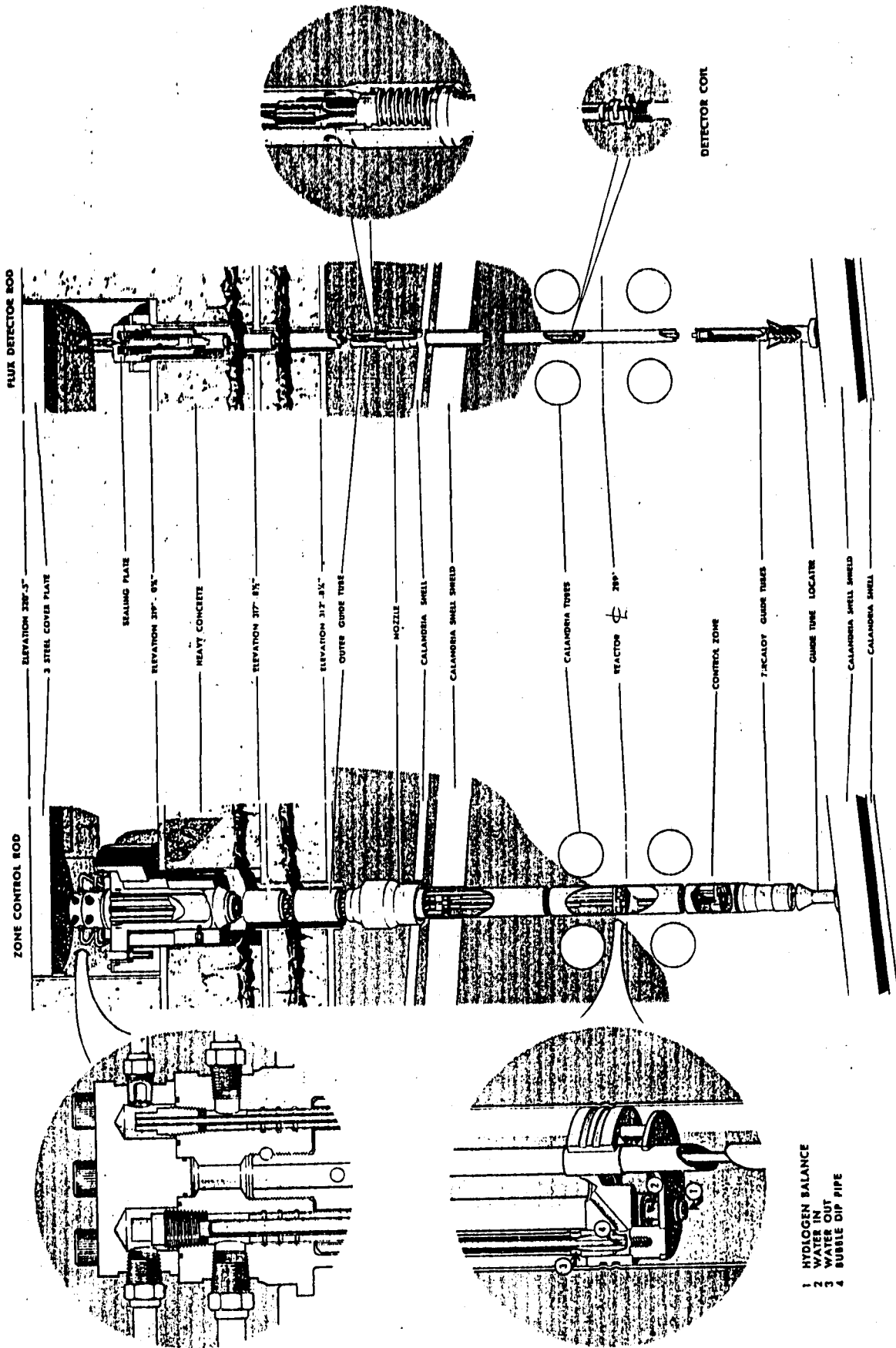
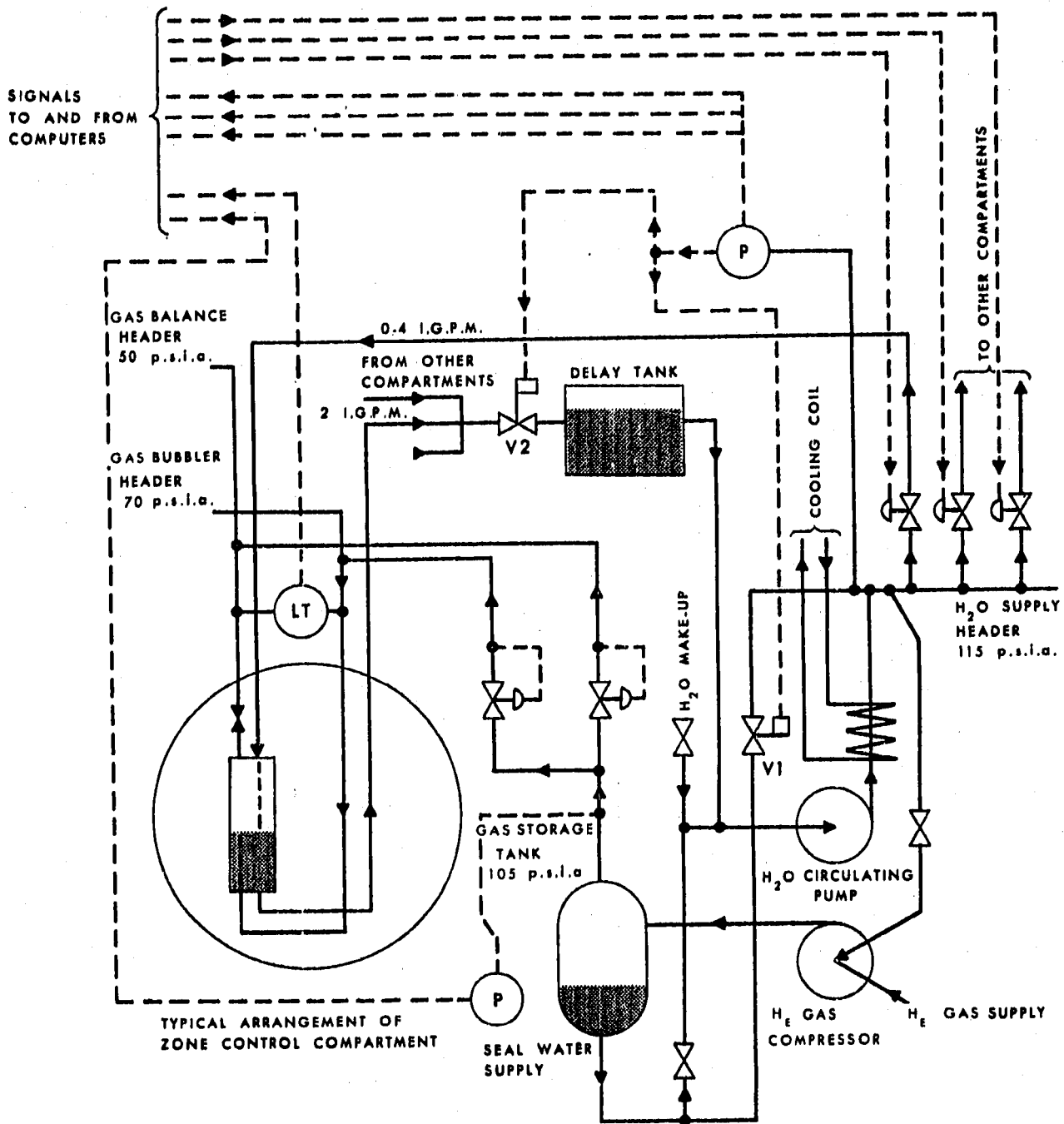


Fig.3 Zone Control and Flux Detector Rods



LT. - LEVEL MEASUREMENT  
VALVES V1 & V2

BOTH CLOSE ON LOSS OF PRESSURE IN H<sub>2</sub>O SUPPLY HEADER  
BOTH CLOSE ON RAPID LOSS OF H<sub>2</sub>O FROM SYSTEM

Fig.4 Simplified Flow Sheet for Zone Control System

## 4 ポイズン管の条件

### 4.1 設計基準（軽水炉指針を適用した場合）

「軽水炉についての安全設計に関する審査指針について」<sup>(3)</sup>（昭和51年11/17）において反応度調整等行い系統，機器に関する項目を付録に抜粋している。

反応度調整系は上記指針では「安全上重要な構築物，系統および機器」，「計測制御系」，「原子炉停止系」，「反応度制御系」に該当する。また反応度調整計の故障を検知し安全保護動作を起されるための系統が「安全保護系」に含まれる。これらが設計において満足すべき条件を概略 Table 2 にまとめた。大まかには，これらの系統は，最小限次の条件を満足するように設計されるべきであるとされる。

- (a) 環境の大きな変化を考慮して設計すること
- (b) 単一故障を想定しても機能を失わないこと
- (c) 施設間の共用は禁止
- (d) 定期的試験検査が可能であること

基本的機能として，通常運転時および運転時の異常な過渡変化時に対して燃料の許容設計限界を越えないことが少くとも必要とされる。

従って ポイズン管の設計にあたって少くとも考慮しなければならない条件で重要と思われる項目に，

- (a) 耐震設計等 (指針 2～6)
  - (b) 少くとも独立 2 系統<sup>㊟</sup> (指針 8, 19, 29, 30)
  - (c) 機能の定期的試験検査 (指針 10, 33)
  - (d) 炉運転時に最大 1 系統分の反応度が投入された場合でも未臨界にできること。(指針 22)
  - (e) 安全保護系の故障に対して安全側 (指針 31)
- があげられよう。

㊟ 停止系および安全保護系については明確にうたわれている。その他については，単一故障を想定する項目（指針 8）が包括的に適要される。

Table 2 Design Basis for Reactivity Control System

車	対象	指針番号	項目	目	内容
IV	原子炉施設全般	1	準拠規格ならびに基準		安全上適切と認められる規格, 基準によること。
		2~6	環境の変化		地震, 洪水, 人為事象, 飛来物, 火災の考慮すること。
		7	共用の変化		原子炉施設間で共用不可。
		8	単一故障を想定		非常用所内電源 or 外部電源のみの運転下で単一故障を考慮する事。
		10	試験可能性		定期的試験および検査ができること。 <sup>*2</sup>
V	計測制御系 原子炉および	12	通常, 異常運転時の機能		燃料の許容設計限界を越えないこと (FDC 仮称)。
		15	出力振動の抑制		FDC。
		16	通常, 異常運転, 事故時の機能		原子炉炉心等の健全性確保, 維持, 監視。
VI	原子炉停止系・反応度制御系及び安全保護系	19	停止系の独立制		高温 (待機, 運転) 状態から未臨界にでき, 高温状態で未臨界維持できる 独立2系統を有すること。FDC。
		20	停止系の高温停止能力		少くとも1系統は, 通常, 異常運転時 Hot → 未臨界, かつ維持。FDC。
		21	停止系の低温停止能力		少くとも1系統は Cold → 未臨界かつ維持できること。
		22	停止系の反応度停止余裕		反応度効果の最も大きな制御棒の完全引抜時にでも未臨界維持可能。
		23	停止系の事故時の維持能力		少くとも1系統は想定事故時に未臨界にでき, 少くとも1系統は維持。
		24	制御棒の最大反応度価値		反応度事故に対し, 冷却材圧力バウンダリを破損せず, また, 炉心冷却できなくなる程炉心等破壊しないこと。
		25	反応度制御系の安全機能		負荷変動, Xe 濃度変化, Hot~Cold 温度変化, 燃焼等の反応度変化の調整。
		26~28	安全保護系の機能		異常運転時に, FDC かつ停止系の単一誤動作に対し FDC。事故時には検知。
		29	安全保護系の多重性		単一故障, 使用状態からの単一の取外しを考慮し多重性をもたせる。
		30, 32	安全保護系の独立性		重複チャンネル間の分離。計測制御系とも分離。
		31	安全保護系の故障モード		駆動源の喪失, 系のしゃ断等に対して安全側であること。
		33	安全保護系の試験可能性		運転中定期的試験。健全性, 多重性をも試験できること。

\*1 正確には運転時の異常な過渡変化時 \*2 Fuel Design Criteria



## 4.2 ポイズン管の設計条件

4.1 で示された指針に基づいてポイズン管を設計するにあたって考慮すべき条件は次の様なものであると考えられる。

- (a) 各制御系（微調整系，粗調整系），安全系は少なくとも独立2系統であることが望ましい。
- (b) 使用する機器の単一故障を想定しても機能を失なわないか安全側であること。具体的には各種の弁，ポンプ，配管，タンク，等の単一故障を考慮し設計すること。
- (c) 各機能の定期的検査を行い，容易に修復，交換等できるようにすること。このために故障確率が比較的高いと思われる機器の修復，交換性を特に良くし，その為に放射能レベルを出来るだけ低くすること。
- (d) あらゆる反応度事故を想定し，この程度をできるだけ小さくする様に各制御系統の容量等が制限される。又，安全系の1系統のみの作動により十分対処できること。このために，通常運転時における反応度の最大投入速度，操作1回当りの反応度投入量も制限される。
- (e) ポイズンの劣化による機能低下を防ぐため，ポイズン濃度を常時監視し，濃度維持をすること。
- (f) 各機器の故障，破断等を検知し安全系を自動的に動作させる安全保護系は多重かつ独立性を有し，運転中定期的に試験が可能であること。
- (g) 耐震，耐火設計。原子炉冷却系構造材からできるだけ離し冷却系の破断等による衝撃等を小さくすること。（配管むちうち，冷却材放出，ポンプ等破損した場合の破損部品飛来等）  
これらの各項は軽水炉における制御棒の設計において払われる考慮と基本的に同一である。

項目別に設計上の検討事項を上げると次の様になる。

(1) 核 特 性

- (イ) 必要制御反応度
- (ロ) ポイズン管本数
  - 微・粗調整系
  - 安 全 系
- (ハ) ポイズンの種類
  - 中性子吸収反応断面積
  - 溶解度（温度依存性）
  - 購 入 性
  - 化学的安定性
  - 放 射 化
- (ニ) ポイズン液濃度
- (ホ) ポイズン管寸法
- (ヘ) ポイズン管材質
- (ト) 炉心配置
- (チ) 安全系反応度
- (リ) 微・粗調整系反応度
- (ヌ) ワース曲線
- (ル) 相互干渉効果
- (オ) 微・粗調整系制御方法
- (ワ) 出力分布

(2) 構 造

- (イ) ポイズン管の構造
- (ロ) " 材質
- (ハ) " 耐圧性
- (ニ) " 耐食性
- (ホ) " 熱膨張
- (ヘ) " 寸法
- (ト) " 製作性
- (チ) " 炉心への据付性
- (リ) " 保修性（ISI含）
- (ヌ) " 耐震性

(3) 系 統

- (イ) 系 統 構 成
- (ロ) 系 統 数
- (ハ) 各機器の配置
- (ニ) 系統内での配管
- (ホ) 系統の耐震性
- (ヘ) ポイズン管冷却システムの必要性
- (ト) ポイズン液面検出系
- (チ) ポイズン濃度検出系
- (リ) 他系統との配置関係

(4) 計 装 制 御

- (イ) 計装系との配置関係
- (ロ) 微・粗調整用ポイズン管による領域制御
- (ハ) 微・粗調整用ポイズン管による出力制御
  - 起動停止時のポイズン管の制御
  - 出力運転時のポイズン管の制御
- (ニ) 安全系の構成とスクラム項目の選定
- (ホ) 計算機による微・粗調整系ポイズン管の自動制御
- (ヘ) インターロック

(5) 安 全 性

- (イ) 系統の多重性
- (ロ) フェールセーフ
- (ハ) セーフ・アズ・イズ
- (ニ) ポイズン液リーク防上及び検出
- (ホ) 待機状態(安全系)

(6) 動 特 性

- (イ) 応答特性
  - 微・粗調整系
  - 安 全 系
- (ロ) 反応度安定性
- (ハ) Xe 振動制御

(7) R & D

(イ) ポイズン制御系 mock-up 試験

○ water hammer の問題

(ロ) ポイズン管の付着残留物の材料へ影響

(ハ) ポイズン管の乾燥法 (必要ならば)

(ニ) ポイズン管内注入拡散

(ホ) 熱除去

(ヘ) 濃度検出法

以下は、微・粗調整系を水位変化でおこなう場合

(ト) 水位変化と反応度の関係

(チ) 水位安定性

(リ) 水位変化速度

(8) その他

燃料有効長 80% まで 2 sec 以内で注入する必要性の検討

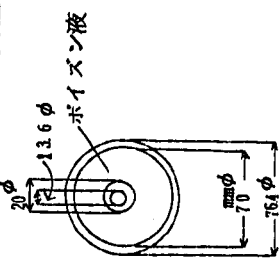
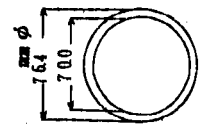
## 5 検 討 結 果

4.2 の検討項目にしたがって今まで検討した結果について、新型炉評価研究 STEP-II 日立報告書<sup>(4)</sup>と対比しながら Table 3 に示す。

Table 3 Design Study of Poison Tube

核 特 性	検 討 項 目	P N C 検 討			日 立 案 ( S T E P - I I )																											
		制 御 対 象	必要制御 反応度( $\beta/K$ )	制 御 方 式	制 御 対 象	必要制御 反応度( $\beta/K$ )	制 御 方 式																									
核 特 性	(イ)必要制御反応度	微調整	出力調整	0.1	ポイズン管	出力調整	0.1	制御棒																								
		粗調整	領域制御	0.4	ポイズン管	領域制御	0.4	重水レベル																								
				1.0 5.0	ポイズン管 重水液体ポイズン	起動及び 出力上昇	7.4	重水レベル																								
		安全系	後備安全系	2.0.0	重水液体ポイズン	燃焼反応度	2 5.0	重水中液体ポイズン																								
				1.8 5.6	ポイズン管 スロー重水タンク	燃焼度 Xe・Sm 反応度	1.4 6.8	ポイズン管 重水タンク																								
			(ロ)ポイズン管本数	日立案とは基準炉心が異なる。			安全系	3 2 本																								
				微・粗調整系(共用)				2 0 本又は2 1 本																								
			(ハ)ポイズンの種類	付録 2 参照			安全系	3 2 本																								
				付録 2 参照				3 2 本																								
				付録 1 溶解度温度依存性参照																												
		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>溶解度</th> <th>購入</th> <th>化学的 安定性</th> <th>放射化</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>(Na<sup>t</sup>)</td> <td>良</td> <td>良</td> <td>良</td> <td>良</td> </tr> <tr> <td>H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>(90% B<sup>10</sup>)</td> <td>良</td> <td>難</td> <td>良</td> <td>良</td> </tr> <tr> <td>Gd<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub></td> <td>良</td> <td>良</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cd<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></td> <td>良</td> <td>良</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				溶解度	購入	化学的 安定性	放射化	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (Na <sup>t</sup> )	良	良	良	良	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (90% B <sup>10</sup> )	良	難	良	良	Gd <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	良	良			Cd <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	良	良			Gd <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>		
	溶解度	購入	化学的 安定性	放射化																												
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (Na <sup>t</sup> )	良	良	良	良																												
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (90% B <sup>10</sup> )	良	難	良	良																												
Gd <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	良	良																														
Cd <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	良	良																														

(Continued)

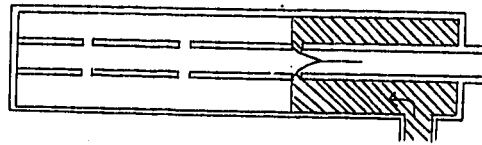
検討項目	P N C 検討	日立案
(a) ポイズン液濃度	<p>ポイズン液を 90% B<sup>10</sup> の H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> とした場合                      微・粗調整系 }                      安全系 }                      2 wt% H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub></p>	Gd <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 1 wt%
(b) ポイズン管寸法	<p>2重管構造 (微・粗調整系, 安全系共用)</p> 	<p>安全系</p> 
(c) ポイズン管材質	ジルカロイ-2	SuS
(d) 炉心配置	<p>付録 2. 3 参照                      日立 STEP-II 報告書における制御棒配置場所へ微・粗調整系ポイズン管を配置可能。(この場合ポイズン管を 1 本ふやす必要あり)                      安全系も日立 STEP-II 報告書と同じ配置で十分。</p>	日立 STEP-II 報告書参照
(e) 安全系反応度	1.8% ΔK/K	1.4% ΔK/K

(Continued)

核 特 性	検 討 項 目	P N C 検 討	日 立 案
	(ウ) 微・粗調整系 (エ) ワース曲線 (オ) 相互干渉効果 (カ) 微・粗調整系 制御方法 (キ) 出力分布	最大 1.0% ΔK/K 付録 4 参照 今後検討 ポイズン管内のポイズン液水位制御。 今後検討 ポイズン液が入った状態の出力分布を燃料健全性の 面から検討。	

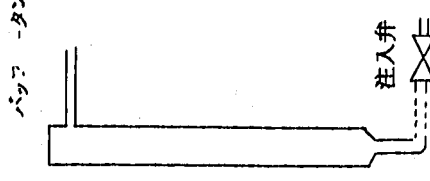
(Continued)

	検 討 項 目	P N C 校 討	日 立 案
	<p>(1) ポイズン管の構造</p>	<p>微・粗調整系、安全系とも同様の2重管構造とするが、内側管の構造が微・粗調整系と安全系で多少異なる。</p> <p>内側管に適当な間隔で孔があり、注入流量を変えることにより水位を変化させる。</p> <p>特徴</p> <p>(1) ポイズン液面が一番下がった位置においてもポイズン液が循環し、冷却する。</p> <p>(2) 循環しているため濃度一定が保たれる。</p> <p>(3) 制御棒と同じ応答性をもつ。</p>	
<p>構造</p>	<p>安全系</p>	<p>内側管の上部にオーバーフロー孔、下部に循環用孔があり、スクラム時に急速注入する。</p>	<p>1 重管構造で急速注入弁開により注入する。</p>





(Continued)

検討項目	P N C 検討	日 立 案
<p>構造</p>	<p>特徴</p> <p>(1) 待機状態が燃料下端近くにでき きる。</p> <p>(2) そのため注入速度がそんなに 早くなくてもよい。</p> <p>(3) 循環しているため冷却性、濃 度一定が保たれる。</p> <p>(4) ウォーターハンマー等の影響 小さい。</p> <p>(5) 交換可能</p>	<p>問題点</p> <p>(1) 待機状態が注入弁であり所定 の時間内に注入するには大き な圧力で注入しなければなら ない。</p> <p>(2) 開速度が早い注入弁必要</p> <p>(3) 交換が困難</p> <p>(4) ウォーターハンマー</p>
<p>造</p>	<p>ジルカロイ-2 "</p>	<p>注入弁</p> 
<p>(=)材質</p>	<p>注入速度がおそいので十分。 今後検討</p>	<p>S u S</p>
<p>(=)耐圧性</p>	<p>今後検討</p>	
<p>(=)耐食性</p>	<p>ポイズン液種類により今後検討必要。</p>	

(Continued)

	検討項目	P N C 検 討	日 立 案
構 造	(a)熱膨張	今後検討	今後検討
	(c)寸法	核特性 (a) 参照	
	(f)製作性	良	良
	(g)炉心への据付性	良	
	(d)保修性	今後検討	
	(e)耐震性 (ISI含)	今後検討	今後検討

(Continued)

検 討 項 目	P	N	C	検 討	日 立	案
(1) 系統構造 微・粗調整系 安全系	付録 5	微・粗調整	ポイズン管	系統概略図参照	日立 STEP-II	ポイズン管系統概略図参照
	"	急速停止系	ポイズン管	"		
(2) 系統数 微・粗調整系	全系統	独立	5	系統		
	ポイズン管	4 本 / 系統	× 5	系統 = 20 本		
安全系	( 21 本配置する場合は 1 系統だけ 5 本になる )					
	全系統	独立	8	系統		全系統独立 8 系統
(1) 各機器の配置	ポイズン管	4 本 / 系統	× 8	系統 = 32 本		ポイズン管 4 本 / 系統 × 8 系統 = 32 本
	全	ポイズン管	系統数	13 系統		
(2) 系統内での配管	今後	検討				今後検討
	落差だけで注入する場合は 15 m 程度必要。					
(3) 系統の耐震性	ワースの大きい所に 4 本が集まらないようにする。					
	今後	検討				今後検討
(4) ポイズン管冷却 系統の必要性	5 cm / sec	で常に流していれば外側壁が 150°C まで冷却必要なし。				冷却系統有り

(Continued)

検 討 項 目	P N C	検 査 日 立 案
(ト) ポイズン液面検 出系	今後検討	今後検討
(イ) ポイズン濃度検 出系	今後検討	今後検討
(ウ) 他系統との配置 関係	今後検討	今後検討
系		
統		

(Continued)

	検討項目	PNC 検討	日 立 案
計 装 制 御	<p>(イ) 計装系と配置関係</p> <p>(ロ) 微・粗調整系の領域制御</p> <p>(ハ) 出力制御</p> <p>起動停止制御</p>	<p>今後検討</p> <p>日立案における配置関係でも可能。</p> <p>21本の微・粗調整用ポイズン管を配置した場合は日立STEP-II報告における領域制御可能。</p> <p>起動</p> <p>(1) 起動前</p> <p>ポイズン管内ポイズン液全挿入</p> <p>重水中ポイズン在</p> <p>(2) 起動→冷温臨界。</p> <p>ポイズン管内ポイズン液面半分程度まで下げる。</p> <p>重水中ポイズン除々に除去しつつポイズン管液面で冷温臨界。</p> <p>(3) 冷却臨界→高温待機</p> <p>ポイズン管内ポイズン液面を下げる。</p> <p>(4) 高温待機→定格出力</p> <p>重水中ポイズンを除去しておこなう。</p>	

(Continued)

	検 討 項 目	P N C 検 討	日 立 案
	<p>停止</p> <p>微・粗調整用ポイズン管内ポイズン液挿入にておこなう。</p> <p>ポイズン管内液面制御によりおこなう。</p>	<p>今後検討</p> <p>スクラム項目にはポイズン管制御特有のものが付加する。</p> <p>微・粗調整用ポイズン管はおの独立に自動制御される。</p> <p>今後検討</p>	
出力制御	<p>(=)安全系の構成とスクラム項目の選定</p>		
計装制御	<p>(≠)計算機による自動制御</p> <p>(≠)制御インターロッキング</p>		

(Continued)

検討項目	P N C 検討	日 立 案
<p>(1) 系統の多重性</p> <p>(2) フェールセーフ</p> <p>(3) フェール・アズ・イズ 今後検討</p> <p>(4) ポイズン液リーク 防止及び検出 今後検討</p> <p>(5) 待機状態 今後検討</p>	<p>安全系8系統のうち7系統作動で十分。 又、微・粗調整系5系統もスクラム信号時には安全系と同じ能力で作動可能。 補助タンク、貯蔵タンクは系統別に独立に設置。 弁類はフェールセーフとなるような構造にする。</p> <p>安全系は燃料集合体下端での待機可能。</p>	<p>安全系8系統のうち7系統作動で十分。</p> <p>今後検討</p> <p>注入弁位置</p>

(Continued)

検討項目	P N C 検討	日 立 案
(1)応答特性 微・粗調整系	制御棒なみの応答性可能。	
安全系	燃料集合体下端までポイズン液面が可能なので応答性良。	今後検討（注入弁開時間に依存）
(2)反応度安定性	今後検討	
(3)Xe振動制御	微・粗調整系ポイズン管の領域制御可能。	

動 特 性



## 6 結 論

今回の反応度制御系の検討では、液体ボイズン制御管を反応度制御系の主要なものとして使用する場合の反応度制御特性、設計条件、必要なR&D等について検討をおこなった。その結果として次の事が認められた。

- (1) 微・粗調整系用の液体ボイズン制御管として2重管構造のものを使用し、ボイズン管内の液面制御をおこなえば、固体制御棒と同じ程度に制御可能である。
- (2) 安全系の急速停止用ボイズン管は、微・粗調整系に用いたものと同じ構造のボイズン管で十分であり、かつ注入に必要なボイズンを貯蔵しておく、ヘッドタンクも高圧に加圧する必要がない。

今後液体ボイズン制御管を設計していくには、設計条件の節で述べた項目の詳細検討が必要である。そのためにはR&Dにより液体ボイズン管の特性、および信頼性を確認しなければならない。

参 考 文 献

- (1) AECL: 「CANDU 500MW Nuclear Power Station」  
Pickering Generating Station Ontario Hydro-AECL (1969)
- (2) BNES: 「Steam Generating and other Heavy Water Reactors」  
Proceedings of the conference held at the Institution of  
Civil Engineers, 14-16 May, 1968
- (3) 原子炉安全技術専門部会安全設計小委員会: 「軽水炉についての安全設計に関する審査指針に  
について」
- (4) 日立製作所: 「新型転換炉評価研究STEP-2, 概念設計(その1)」
- (5) 日本化学学会: 「化学便覧 基礎編Ⅱ」

付録1 ポイズン溶解度温度依存性<sup>(5)</sup>

H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 溶解度の温度依存性

温 度	0 °C	10	20	25	30	40	60	80	100
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> の溶解度	wt% 270	352	465	543	634	817	1296	1906	2753
天然B利用の場合 のB <sup>10</sup> 含有量	ppm 900	1200	1600	1900	2200	2800	4500	6600	9500
90%濃縮B利用 の場合のB <sup>10</sup> 含有量	ppm 4000	5400	7200	8600	9900	12600	20200	29700	42700

Gd<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 溶解度の温度依存性

温 度	0 °C	10	20	25	30	40	60	80	100
溶 解 度	wt% 383	319	228	234	221	174	—	—	—

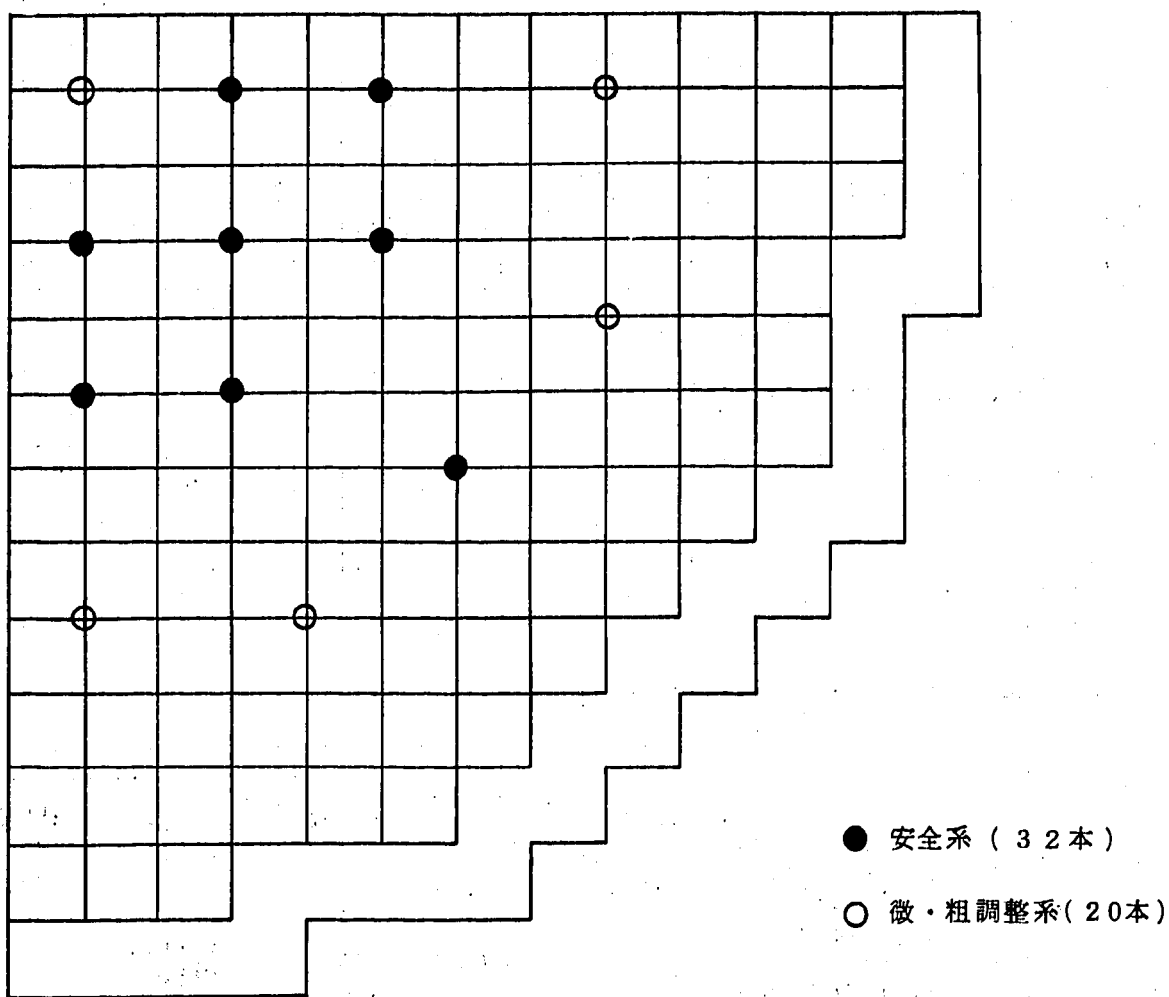
CdSO<sub>4</sub> 溶解度の温度依存性

温 度	0 °C	10	20	25	30	40	60	80	100
溶 解 度	wt% 4302	4312	4331	4341	4353	441	45.56		

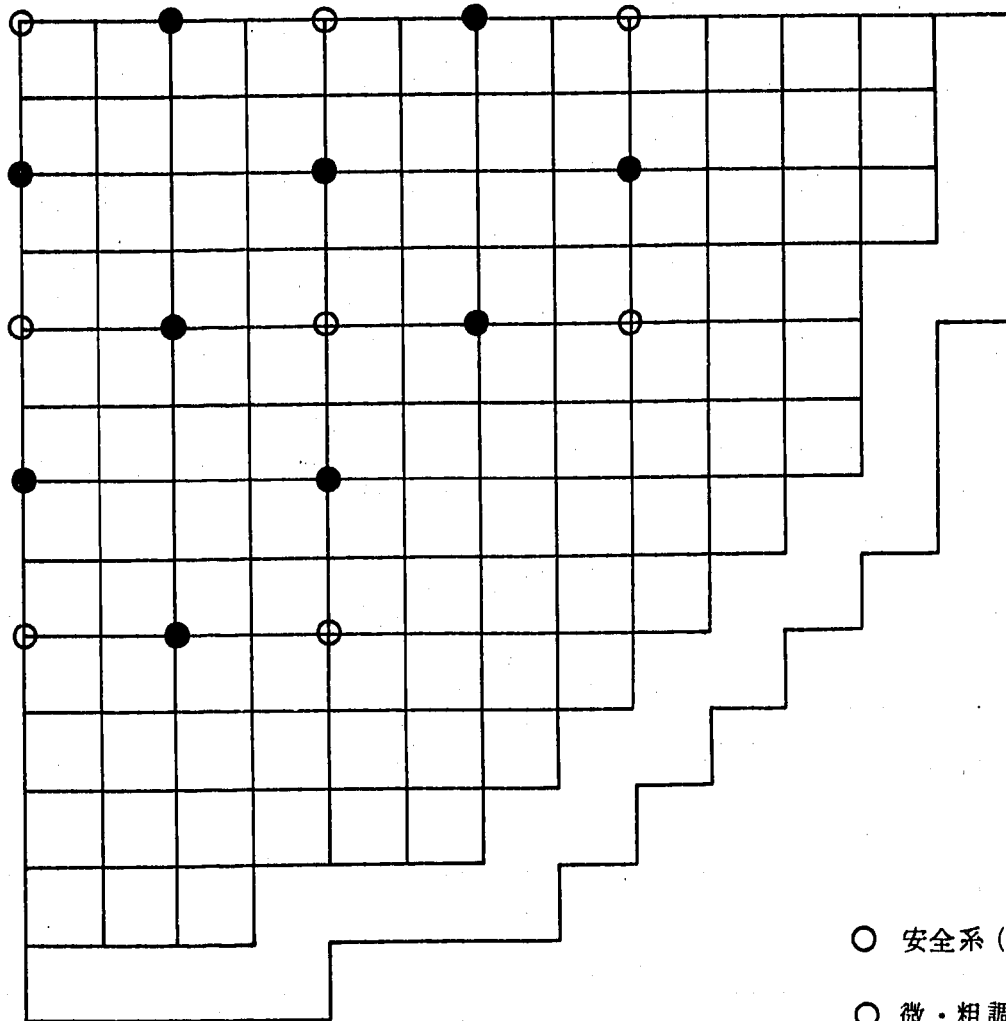
付録2 各制御量に対するポイズン管の諸元

	制 御 量	制御反応度	1本の最大 制御反応度	本 数	内 径	B <sup>10</sup> 濃度
微調整系	出力調整 Xe 振動	$\Delta K/K$ 0.5%	$\Delta K/K$ 0.065%	20本	二重管構造 外側管内径 70mmφ 内側管外径 20mmφ	ppm 約3,000
粗調整系	起動及び 出力上昇の一部	1.0%		又は 21本		
安全系	主安全系	1.8%		32本		

付録3 ポイズン管の炉心内配置



ポイズン管配置図例 1

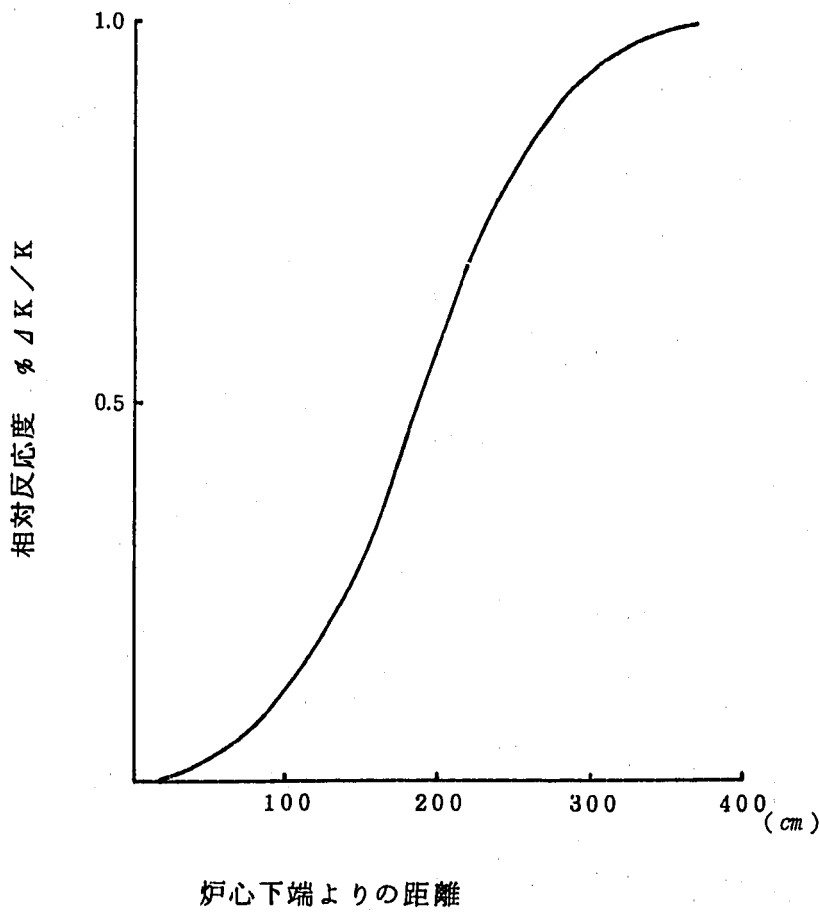


○ 安全系 ( 3 2 本 )

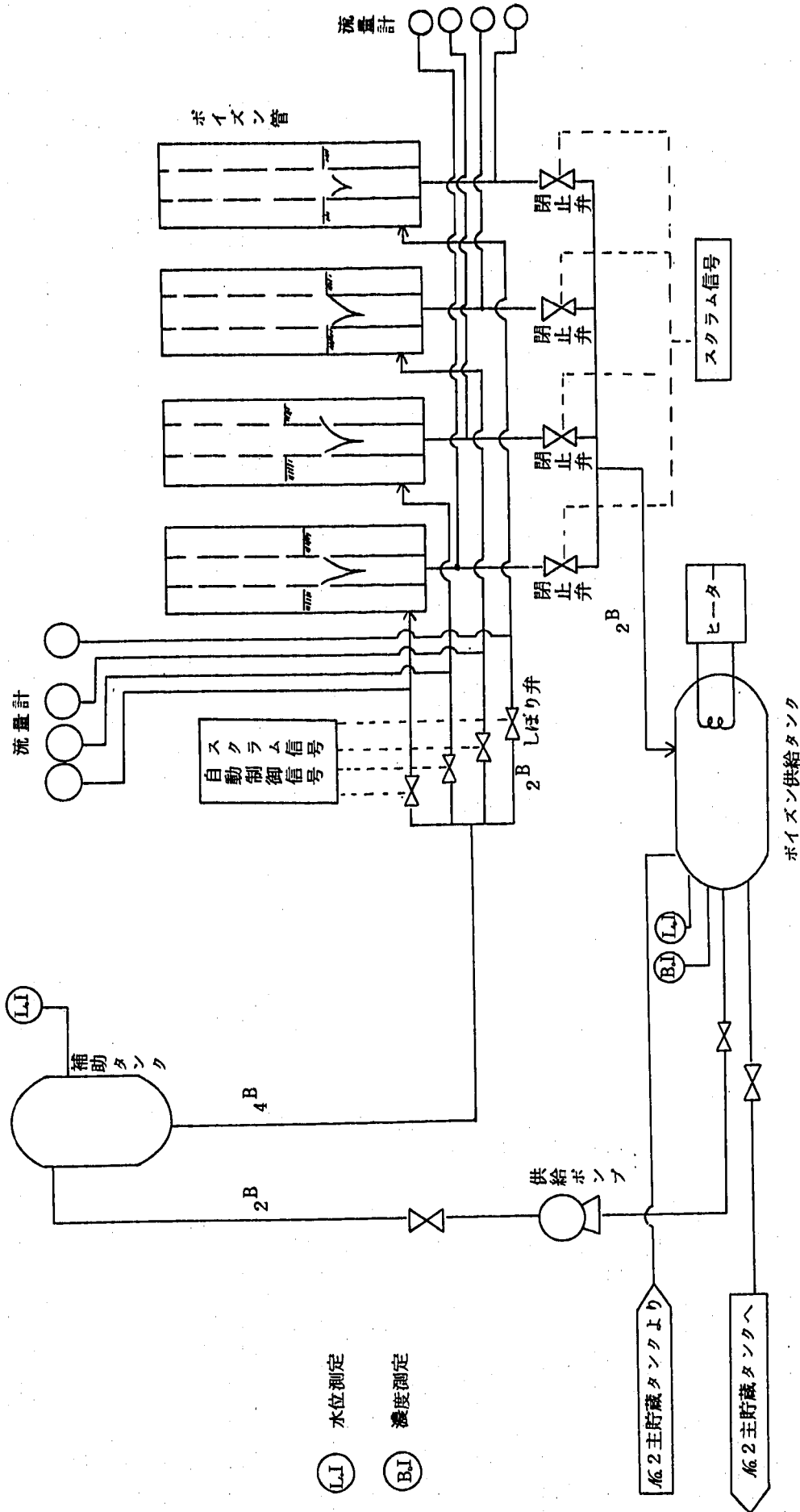
○ 微・粗調整系 ( 2 1 本 )

ポイズン管配置図例 2

付録4 微・粗調整系ポイズン管ワース曲線



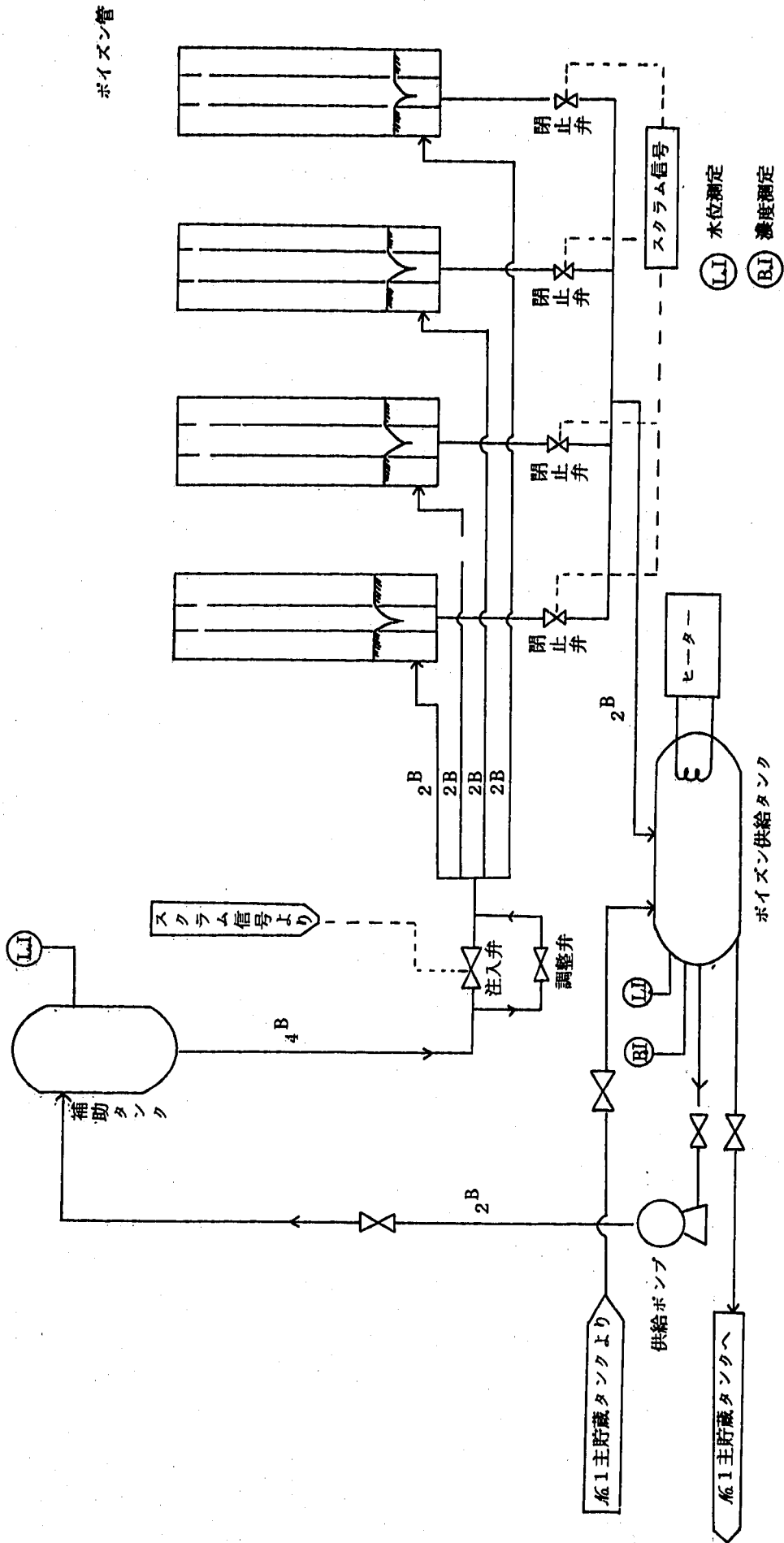
付録5 ポイズン管系統概略図例



注記

本系統は1系統のみ示す  
 全系統数 独立 5系統  
 ポイズン管4本又は5本/系統×5系統

微・粗調整ポイズン管系統概略図



注記

本系統は1系統のみ示す

全系統数 独立 8系統

ポイズン管 4本/系統 x 8系統

急速停止系ポイズン管系統概略図