

JAERI-M

4 4 4 6

Fissiochemistry 研究用流動ループの  
概念設計

1971年5月

清瀬量平・佐藤章一・森山 昇

石井敏雄・平田実穂・助川友英  
岡本次郎・浜ノ上熊男・池添康正  
徳永興公・岡島正直・兼子有史  
松井一秋・木村良雄・山崎彌三郎  
大島恵一・団野皓文

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

## Fissiochemistry 研究用流動ループの概念設計

日本原子力研究所 高崎研究所研究部

田野皓文・山崎弥三郎・佐藤章一

森山 昇・岡本次郎・浜ノ上熊男

池添康正・徳永興公

　　大島恵一<sup>\*</sup>・清瀬量平<sup>\*</sup>・兼子有史<sup>\*</sup>　　松井一秋<sup>\*</sup>・木村良雄<sup>\*</sup>

動力炉開発管理室

平田実穂

東海研究所研究炉管理部

石井敏雄・岡島正直

東海研究所原子炉工学部

助川友英

( 1 9 7 1 年 5 月受理 )

**要 旨** 核分裂片による化学反応 (Fissiochemicalな反応) を動的に研究し、化学原子炉研究の基礎データを得るために原子炉内反応装置として、流動ループの概念設計研究を行なった。JRR-4設置を仮定し、可能を炉内放射線の場に反応器を置いた場合の、反応器の発熱量および反応収率の計算を行なった。反応器の除熱を考えて、冷却ガスを外側に流す外部冷却型反応器と、反応ガス自体で除熱する内部冷却型反応器を考え、それぞれの温度分布を推定した。ガス中の核分裂生成物量を評価した。さらに、ヘリウム冷却型反応器に窒素ガスを主とする反応ガスを流した場合を考えて、JRR-4炉室設置を想定した具体的なフローシートを設計した。

鉄(反応器主成分)、窒素(反応ガス主成分)の発熱は、鉄ではガンマ発熱が主で約0.32 wat/ $\nu_{cm^3}$ 、窒素では核分裂片による発熱が主となり、2.5 $\mu$ 厚さの20%U-Pd合金(比重1.28,  $^{235}U$ 濃縮度9.3%) $6cm \times 10cm$ のはく5枚を使用した反応器の例では、燃料とその付近の容器の発熱量は50kcal/hr, 反応ガスの発熱は7.2kcal/hrの程度となる。20分間ループを運転したとき生成するI+Xe+Krの核分裂生成物放射能は、総計約1Ciの程度である。以上の条件で流動ループは設計できる見込みが立った。

\* 東京大学工学部

Conceptual Design of the Reactant Flow Loop  
For Fissiochemical Studies

Akibumi DANNO, Yasaburo YAMAZAKI, Shoichi SATO, Noboru MORIYAMA,  
Jiro OKAMOTO, Kumao HAMANOUE, Yasumasa IKEZOE, Okihiro TOKUNAGA,  
Keichi OSHIMA\*, Ryohei KIYOSE\*, Tomochika KANEKO\*,  
Kazuaki MATSUI\* and Yoshio KIMURA\*

Division of Research, Takasaki Radiation Chemistry  
Research Establishment, JAERI

Mitsuho HIRATA,  
Office of Power Reactor Projects, JAERI

Toshio ISHII, Masanao OKAJIMA,  
Division of Research Reactor Operation, Tokai  
Research Establishment, JAERI

Tomohide SUKEGAWA,  
Division of Reactor Engineering, Tokai Research  
Establishment, JAERI

(Received May, 1971)

### Abstract

A conceptual design of a gas flow loop has been made for dynamic fissiochemical reaction studies. Heat generation and reaction yields in the reactor section of the loop are estimated assuming the radiation fields of JRR-4 (Japan Research Reactor - 4, swimming pool type, with 2.5 MW), together with the temperature distributions in the reaction vessels of two types of cooling: (1) The external gas cooling type, in which cooling is done by the third gas flowing outside jacket of the vessel and (2) The internal gas cooling type, in which vessel temperature is controlled by the reactant gas itself. Fission product activities are also evaluated.

The flowsheet of the loop is prepared which has the helium cooling system for the temperature control of the reactant gas, nitrogen. Main structural component, iron is heated mainly by gamma heating at a rate of

---

\* Faculty of Engineering, The University of Tokyo.

about 0.32 watt/cm<sup>3</sup>, and the reactant, nitrogen is heated mainly by fission fragment energies released within the reaction vessel. A vessel designed to contain 5 foils of 20% U - Pd alloy, 2.5  $\mu$  thick, 6 cm in width and 10 cm in length will be heated at a rate of 50 kcal/hr, and the reactant gas at 7.2 kcal/hr. The volatile fission products I + Xe + Kr will have a total activity of 1 Ci, after 20 minutes operation of the loop. A practical loop design is presented, based on the proposed power-up plan of JRR-4.

## 目 次

1. 序 言 .....	1
2. 反応器各部における熱発生および反応収率 .....	2
2-1. 核分裂片 (fission fragment)による発熱 .....	2
2-2. 中性子, 荷電粒子, ガンマ線による発熱 .....	3
2-3. 反応器各部における熱発生 .....	4
2-4. 反応収率の計算 .....	5
3. 反応器の概念設計 .....	9
3-1. 外部冷却型反応器 .....	9
3-2. 内部冷却型反応器 .....	16
3-3. 核分裂生成物生成量 .....	19
4. 流動ループの概念設計 .....	26
4-1. 設計条件 .....	26
4-2. フローシートと主要設計諸元 .....	32
5. 結 言 .....	40
付録 1 : A G N 流動ループ実験概要 .....	42
付録 2 : B N L 実験計画概要 .....	42

## 1. 序 言

放射線化学研究委員会化学用原子炉分科会の化学研究炉専門部会においては、放射線化学の工業利用のための基礎研究として、核分裂片による化学反応すなわち、Fissionochemical 反応の実用化の可能性を検討するため、研究用原子炉における照射実験を計画し、その第一段階としてすでに低温化学照射装置 LTFL を設計製作し、JRR-3実験孔に設置し基礎的実験を行なっている。しかしながら、工業規模で Fissionochemical 反応を行なわせる場合は、原子炉内での照射による生成反応と原子炉外での反応生成物の精製回収を連続的に行なうこと必要とされる。また、カプセル照射による静的な反応 G 値は一種の平衡状態に対応するものであり、接触時間の短かい連続操作の場合の基礎データとしては不適当である。したがって、いわゆる動的 G 値を知るためにには、実際に反応系を流動させた状態で反応率を測定できる流動ループによる照射実験が行なわれなければならない。特に生成物分解反応が起こりやすい反応系の場合には、動的 G 値は静的な G 値よりかなり大きく、カプセル照射実験からは一見不可能と思われる反応も流動系においては十分な収率で実現することも予想される。

このような Fissionochemistry 研究用の流動ループの設計に当っては、使用する研究炉の特性（特に照射位置における中性子束およびガンマ線量率の分布）、入手しうる Fission Fragment 発生用核燃料の形態、研究の対象とする反応系、反応生成物の分析の方法とその感度などが重要な前提条件となる。こゝでは研究炉として熱出力約 3 MW のスウェイミングプール炉（改造後の JRR-4 を想定、炉心外周熱中性子束～ $1 \times 10^{13} n/cm^2 \cdot s$ 、ブラックストラップを考慮した熱中性子束～ $5 \times 10^{13} n/cm^2 \cdot s$ ）をとり、反応系としては  $N_2 - CH_4$  または  $N_2 - C_2H_4$  を想定した。また実験用の核燃料としてはすでに入手済みの U-Pd 合金箔 ( $6 cm \times 10 cm$ 、厚さ  $2.5 \mu$ 、U の含有率 20%、 $^{235}U$  濃縮度 9.33%) および Honeycomb 型のものを考えた。反応器としては、動的 G 値の測定に最低必要と考えられる比較的小型の外部冷却型反応器（A 型反応器と略称）と、反応生成物の除染などについてもある程度工業的試験が可能な大型の内部冷却型反応器（B 型反応器と略称）の両者について、反応器各部での発生熱量、反応ガスおよび冷却ガスの流速と反応器内の温度分布との関係、さらに反応生成物の収量および F.P. ガスの生成量などを検討し、反応器の概念設計を行なった。その結果にもとづき JRR-4 に附設すべき流動ループ（外部冷却型反応器使用）の機器の基本仕様と配置およびフローシートをまとめた。

## 2. 反応器各部における熱発生および反応収率

反応用流動ループを原子炉内に設置した場合、そのループは炉内の放射線場および、内蔵する核分裂物質からの核分裂片の照射を受け発熱する。したがって、反応のための適当な温度条件を保つて制御するためには、照射による反応管各部の熱発生量を知る必要がある。

核分裂による熱発生は次の通りである。核分裂 1 回当たりの放出エネルギーは約 200 MeV で、そのうち約 168 MeV は核分裂片（以下 F.F.）の運動エネルギーとして与えられ、燃料体およびその近傍で吸収され熱を発生する。残りの約 32 MeV は核分裂ガムマ線、核分裂中性子、および F.F. のベータ、ガムマ線等に費やされる。F.F. 吸収以外の熱発生の原因の主なものは

- 1) 中性子エネルギーの減衰分の吸収
- 2) 核反応により発生した荷電粒子の吸収
- 3) ガムマ線の吸収

である。

以下、燃料体、反応系、反応容器の各部について、熱発生量の概算を行った。反応系は窒素 ( $N_2$ )、反応容器は鉄 (Fe) とし、炉内中性子束、ガムマ線束を次の様に仮定した。

高速中性子束	$2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$	1 MeV
熱外 "	$2 \times 10^{12}$	" 1 keV
熱 "	$1 \times 10^{13}$	" 0.025 eV
ガムマ線束	$4 \times 10^{11}$	" 2 MeV
	$2 \times 10^{11}$	" 5 MeV
	$2 \times 10^{10}$	" 8 MeV

### 2-1 核分裂片 (fission fragments) による発熱

ウラン - 235 による出力  $P$  (watt) は次式で示される。

$$P = \frac{V_f \Sigma_f \phi}{3.1 \times 10^{10}} \quad (1)$$

ただし、 $V_f$  は燃料体体積、 $\Sigma_f$  はマクロ核分裂断面積 ( $^{235}\text{U}$ )、 $\phi$  は熱中性子束である。この内で、F.F. の運動エネルギーとなるのが 84% で、F.F. 運動エネルギー中の分率  $E_{SG}$  が燃料体に吸収されないで他の媒体に吸収される。ここで他の媒体とは反応系を意味し、容器や他の燃料体には吸収されないと仮定する。これを用いて、燃料体の出力密度、 $P_f$  および反応系の出力密度  $P_t$  は、(2), (3) 式の如くなる。

$$\begin{aligned} P_f &= 0.64 \times (1 - E_{SG}) \frac{P}{V_f} \\ &= 2.71 \times 10^{-11} (1 - E_{SG}) \Sigma_f \phi \\ &= 6.97 \times 10^{10} \sigma_f \phi \frac{g}{V_f} (1 - E_{SG}) \\ &= 4.02 \times 10^{-11} (1 - E_{SG}) \phi \frac{g}{V_f} [\text{watt/cm}^3] \end{aligned} \quad (2)$$

$$P_r = 4.02 \times 10^{-11} E_{SG} \phi \frac{g}{V_r} \quad [\text{watt/cm}^3] \quad (3)$$

ただし、 $g$ は $^{235}\text{U}$ グラム数、 $\sigma_f$ はミクロ断面積、 $V_r$ は反応系の体積である。

### (例1) 燃料体における発熱

燃料体諸元：20%U-80%Pd合金、比重12.6、厚さ $2.5\mu$ 、 $^{235}\text{U}$ 濃縮度93.3%， $E_{SG} = 0.25$ 。

以上の値をとって計算する。

$$\left. \begin{aligned} P_f &= 8.15 \times 10^2 \text{ watt/cm}^3 \quad (\phi = 1 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}) \\ &= 2.40 \times 10^3 \text{ watt/cm}^3 \quad (\phi = 2.5 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

### (例2) 反応系における発熱

#### i) A型反応器(第3章参照)

$^{235}\text{U} = 0.0338 \text{ g}$ ； $E_{SG} = 0.125$  (片面利用)； $\phi = 1 \times 10^{18}$ ； $V_r = 18.8 \text{ cm}^3$   
( $A = 1.88 \text{ cm}^2$ ,  $\ell = 10 \text{ cm}$ )として

$$P_r = 9.05 \times 10^{-2} \text{ watt/cm}^3 \quad (5)$$

#### ii) B型反応器

$^{235}\text{U} = 0.426 \text{ g}$ ； $\phi = 1 \times 10^{18}$ ； $V_r = 645 \text{ cm}^3$  ( $A = 21.5 \text{ cm}^2$ ,  $\ell = 30 \text{ cm}$ )； $E_{SG} = 0.25$ として,

$$P_r = 6.64 \times 10^{-2} \text{ watt/cm}^3 \quad (6)$$

#### iii) BNL型 0.040 in. Hexagon, 長さ1 ft, 外径1.5 in.

$^{235}\text{U} = 4.15 \text{ g}$ ； $\phi = 1 \times 10^{18}$ ； $V_r = 345 \text{ cm}^3$  ( $A = 11.3 \text{ cm}^2$ ,  $\ell = 30.5 \text{ cm}$ )； $E_{SG} = 0.25$ として,

$$P_r = 1.21 \text{ watt/cm}^3 \quad (7)$$

## 2-2 中性子、荷電粒子、ガンマ線による発熱

### 2-2-1 中性子散乱による熱発生

中性子が媒体中を通過し、そのエネルギーを減衰し、媒体に熱を与える。その熱量は次の通りに示される。

$$H_1 = C_0 \int dE(E) \Sigma_s(E) \phi(E) dE \quad (8)$$

ただし、 $H_1$ は出力密度( $\text{watt/cm}^3$ )、 $dE(E)$ はエネルギー $E$ の中性子が1回の散乱当たりに失うエネルギーの平均値(MeV)、 $\Sigma_s(E)$ はマクロ散乱断面積( $\text{cm}^{-1}$ )、 $\phi(E)$ は中性子束( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{MeV}^{-1}$ )、 $C$ は定数 $1.6 \times 10^{-18}$ ( $\text{watt} \cdot \text{sec} \cdot \text{MeV}^{-1}$ )である。

$dE$ は、1衝突当たりのエネルギー対数平均減少 $\xi$ より求める事ができる。鉄の場合  $\xi = 0.0357$ 、窒素では、 $\xi = 0.1373$ である。また、微分散乱断面積として、

鉄	窒素
$\sigma_s(\text{th}) = 11 \text{ barn}$	$\sigma_s(\text{th}) = 10 \text{ barn}$
$\sigma_s(\text{epi}) = 11.4 \text{ "}$	$\sigma_s(\text{epi}) = 9.9 \text{ "}$
$\sigma_s(\text{fast}) = 2.1 \text{ "}$	$\sigma_s(\text{fast}) = 0.815 \text{ "}$

の値を使って、鉄と窒素の熱発生量を求める

$$H_1(\text{Fe}) = 2.3 \times 10^{-3} \text{ watt/cm}^3 \quad (9)$$

$$H_1(\text{N}_2) = 5.6 \times 10^{-6} \text{ watt/cm}^3 \quad (10)$$

となる。(但し、窒素は常温、5気压とする)。

2-2-2 中性子による核反応により発生した荷電粒子のエネルギー吸収による熱発生との発熱量は、次式で示される。

$$H_2 = C_0 \int E' \Sigma_a(E) \phi(E) dE \quad (11)$$

$E'$ は発生した荷電粒子のエネルギー(MeV),  $\Sigma_a(E)$ は、エネルギー  $E$  の中性子に対する荷電粒子放出のマクロ断面積である。この場合、窒素-14の( $n, p$ )反応を考えればよい。

$$^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}, \quad \sigma_a(\text{th}) = 1.68 \text{ barn}$$

$$E' = 0.624 \text{ MeV}$$

常温5気压の窒素では、その荷電粒子による熱発生量  $H_2$  は、

$$H_2(\text{N}_2) = 2.26 \times 10^{-4} \text{ watt/cm}^3 \quad (12)$$

となる。

2-2-3 ガンマ線吸収による発熱

この発熱量は次式で示される。

$$H_3 = C_0 \int E \mu_a(E) \phi^r(E) dE \quad (13)$$

$\mu_a(E)$  はエネルギー  $E$  の  $\gamma$  線のエネルギー吸収係数 ( $\text{cm}^{-1}$ ) である。前記のガンマ線束を仮定すると、鉄及び窒素の発熱量は、

$$H_3(\text{Fe}) = 5.64 \times 10^{-2} \text{ watt/cm}^3 \quad (14)$$

$$H_3(\text{N}_2) = 3.83 \times 10^{-6} \text{ watt/cm}^3 \quad (15)$$

となる。

2-3 反応器各部における熱発生

反応器各部の熱発生は前述のものの総和である。

反応容器の鉄では、

$$H(\text{Fe}) = 5.87 \times 10^{-2} \text{ watt/cm}^3$$

となる。また、 $\gamma$  線束を  $3 \times 10^{12}$  (1MeV),  $2.4 \times 10^{12}$  (2MeV),  $6 \times 10^{11}$  (5MeV)  $\text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$  とすると、 $H(\text{Fe})$  は  $0.323 \text{ watt/cm}^3$  となる。したがって、反応容器では、ガンマ発熱が主で

ある。

反応系の窒素では、核分裂片以外のものによる発熱の総和は、 $3.20 \times 10^{-4} \text{ watt/cm}^3$  で、核分裂片による発熱が主である事がわかる。前に述べたように A型反応器の出力密度は(5)式のように  $9.05 \times 10^{-2} \text{ watt/cm}^3$  である。燃料体での発熱  $P_f$  は、(2)式と(4)式により 20%U-80%Pd 合金、厚さ  $2.5\mu$   $^{235}\text{U}$  濃縮度 93.3% の燃料で、中性子束  $1 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ ,  $E_{SG} = 0.25$  とすると、 $P_f = 8.15 \times 10^2 \text{ watt/cm}^3$  である。

これによると、燃料体発熱が相当大きくて冷却の必要があり、燃料体及び反応容器の熱発生を考慮に入れて反応ガスの流動、温度（冷却）条件の設計を行う必要がある。

## 2-4 反応収率の計算

核分裂率 (Fission rate  $\equiv F.R.$ ) は、核分裂物質量と中性子束によって次の様に示される。

$$\begin{aligned} F.R. &= \sum_f \phi \\ &= N\sigma\phi \quad [\text{fissions/cm}^3 \cdot \text{sec}] \end{aligned} \quad (16)$$

ただし、 $\sigma(^{235}\text{U}) = 577 \text{ barn}$ ,  $N$  は単位体積中に含まれる核分裂性原子数である。また全核分裂率 (T.F.R) は、燃料体の体積を  $V_f$  として、

$$\begin{aligned} T.F.R. &= V_f \sum_f \phi \\ &= \frac{6.02 \times 10^{23}}{235} g\sigma\phi \end{aligned} \quad (17)$$

ただし、 $g$  は  $^{235}\text{U}$  のグラム数である。

次に、 $^{235}\text{U}$  核分裂 1 回から約 200 MeV 放出されるが、そのうち核分裂片の運動エネルギーとなる分率、 $E_{KE} = 0.84$  である。自己吸収されない外の媒体に吸収される分率、 $E_{SG}$  は、例えば、 $3\mu\text{UO}_2$  film の場合約 0.40,  $2.5\mu\text{U-Pd}$  film で 0.25 である。また他の燃料体等に吸収されて損失となる分率を  $E_{EG}$  とする。このとき、反応系に吸収される核分裂片のエネルギーを  $E_{dep}^{f.f.}$  ( $\text{eV/sec}$ ) とすると、次のようなになる。

$$\begin{aligned} E_{dep}^{f.f.} &= 200 \times 10^6 \times V_f N \sigma\phi \times E_{KE} \cdot E_{SG} (1 - E_{EG}) \\ &= 1.68 \times 10^8 E_{SG} V_f N \sigma\phi \quad (E_{KE} = 0.84, E_{EG} = 0) \end{aligned} \quad (18)$$

核分裂片以外の放射線による吸収エネルギーは、前節の様に、放射線の種類、吸収媒体を想定して計算する事ができる。

流動ループの反応ガス中の生成物濃度は次の様にして求められる。全吸収エネルギーを  $E_{dep}$  ( $\text{eV/sec}$ ), G 値を G, 生成分子数を M.P., プロセスガス分子数を M.F. とすると、

$$M.P. = G \cdot E_{dep} \cdot 10^{-2} = 1.68 \times 10^6 G E_{SG} V_f N \sigma\phi \quad (\text{個/sec})$$

$$M.F. = 6.02 \times 10^{23} \frac{273}{T} \frac{A U P}{22.4 \times 10^3} \quad ("")$$

となる。ただし T はプロセスガス温度 ( $^{\circ}\text{K}$ ), P は圧力 (atm), A は反応器断面積 ( $\text{cm}^2$ ), U はプロセスガス線速度 ( $\text{cm/sec}$ ) とする。従って、濃度 C は、

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{M.P.}{M.F.} \\
 &= 3.40 \times 10^{-16} \frac{G E_{SG} g \phi T}{A U P}
 \end{aligned} \tag{19}$$

と示される。

(例1) 反応器諸元

2重管燃料内 密着方式

内管 O.D. = 38 mm. 厚さ = 3 mm

外管 O.D. = 62 mm. 厚さ = 2 mm

内管の中をプロセスガスが流れ、内管と外管の間を冷却材が流れるようにする。燃料は、前述のU-Pd合金箔を円筒状に巻き、Al等のフレームで支持し、それを1ユニットとして、5ユニット使用する。

(例2) 吸収エネルギーと生成物収量

熱中性子束を  $2.5 \times 10^{13} n/cm^2 \cdot sec$ ,  $E_{SG} = 0.125$  (片面のみ利用) とすると、 $E_{dep}^{f.f.} = 1.315 \times 10^{20} eV/sec$  となる。

$n \cdot \gamma$  照射下にある系の体積は  $260 cm^3$  で、吸収線量を  $1 \times 10^8 Rad/hr$  とすると、 $E_{dep}^{n.\gamma.} = 1.51 \times 10^{20} \frac{P}{T} [eV/sec]$  ( $P: atm, T: ^\circ K$ ) となる。ところでF.F. は、常温常圧の空气中で  $2.5 cm$  の飛程を持っている。もし、温度を上げたり、圧力を下げるとF.F. は反応系だけでなく、他の燃料体や容器で吸収されF.F. の利用にとって損失がでてくる。ここで、この反応器ではF.F. の飛程を  $10\%$  に押えると、F.F. の利用効率をあらわすパラメーターを  $\alpha$  として、

$$\frac{P}{T} = \frac{9.16 \times 10^{-3}}{\alpha}, \quad \alpha \leq 1 \tag{20}$$

の( $P, T$ )を選ぶ必要がある。 $\alpha = 1$  の時が、反応体積が全部有効に、F.F. を吸収していることになる。中性子とガンマ線の吸収エネルギーをこの  $\alpha$  を用いて表わすと、

$$E_{dep}^{n.\gamma.} = \frac{1.318 \times 10^{18}}{\alpha} [eV/sec] \tag{21}$$

となり、全吸収エネルギー中のF.F. 吸収エネルギーの分率を  $\eta$  とすると、

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{E_{dep}^{f.f.}}{E_{dep}^{f.f.} + E_{dep}^{n.\gamma.}} \\
 &= \frac{1.315 \times 10^{20}}{1.315 \times 10^{20} + 1.318 \times 10^{18}/\alpha} \\
 &\approx \frac{100}{100 + \alpha}
 \end{aligned} \tag{22}$$

$\eta$  と  $\alpha$  の関係を示したのが図1である。

生成物の濃度  $C$  は

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{(M.P.)^{f.f} + (M.P.)^{n.r}}{M.F.} \\
 &= \frac{G}{U} (2.67 \times 10^{-3} \alpha + 2.78 \times 10^{-5}) \\
 &= 2.67 \times 10^{-3} \frac{G}{\eta U} \tag{23}
 \end{aligned}$$

と表わされ、 $C/G$ と $U$ の関係を示したのが図2である。したがって、高収率を得るために $\alpha=1$ でできるだけプロセスガスの速度を遅くする事が必要である。しかし、この計算では生成物分解の $G$ 値や、連鎖反応による生成物は、考慮にいれていない点を留意しなければならない。

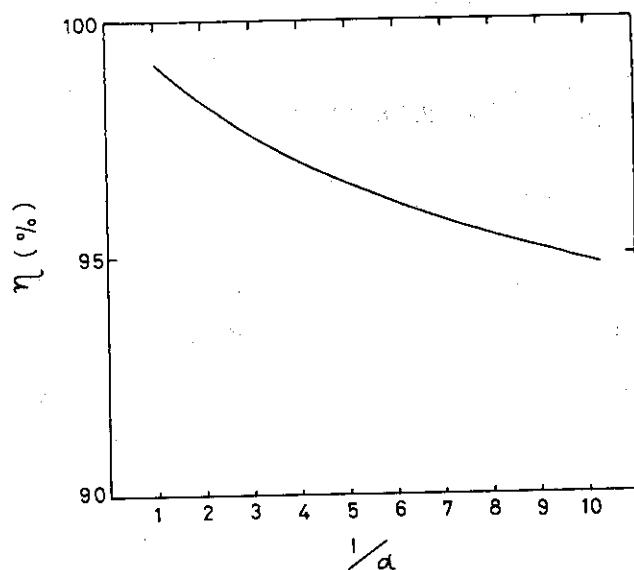


図-1 全吸収エネルギー中の核分裂片吸収エネルギー分率 $\eta$ と $\alpha$ の関係

$$\eta = E_{dep}^{ff} / (E_{dep}^{ff} + E_{dep}^{n.r})$$

$$\alpha = 9.16 \times 10^{-8} (T/P)$$

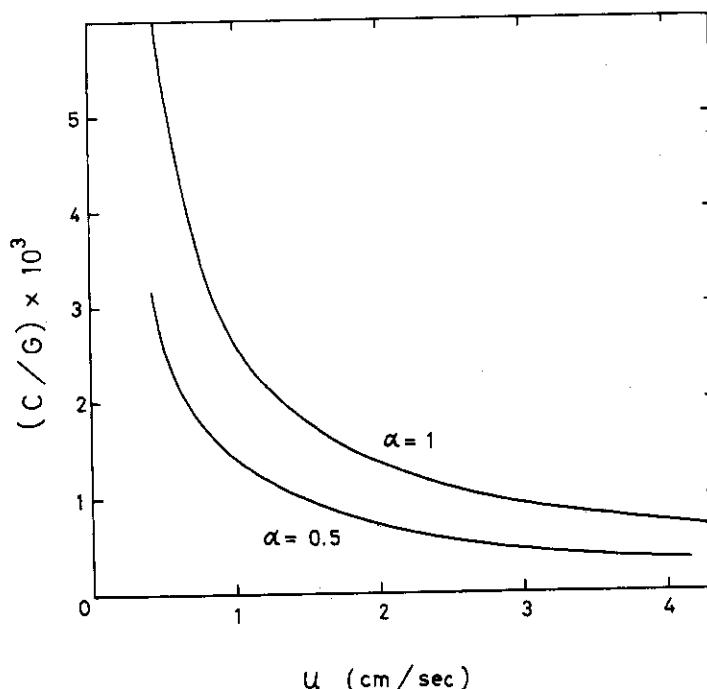


図-2  $(C/G)$ と流速 $u$ の関係

$$(C/G) = (2.67 \times 10^{-8} \alpha + 2.78 \times 10^{-5}) / u$$

### 3. 反応器の概念設計

#### 3-1 外部冷却型反応器

##### 3-1-1 外部冷却型反応器の特徴

(1) 燃料体からの発生熱を冷却ガスで外部冷却する。

(2) 従って内部を流れる反応ガス流量を自由に変えることができる。特に小流量の範囲の実験が可能である。

(3) 小流量であるため、収率を比較的大にとることができ、one pass throughとして滞留時間のG値に及ぼす影響を実験できる。

(4) 湿度、圧力、流量のパラメータを比較的独立に変えることが可能である。

(5) 燃料体の工作が容易で、小規模な実験に適する。

##### 3-1-2 反応器の形状

###### (1) 燃料体

燃料体には表1に示すU-Pd合金箔を用いることにし、その形状は図3のように用筒形を一単位として、必要に応じて数単位（ここでは5単位として考えられている。）を圧力容器の壁に密着して納める。

表-1 U-Pd合金板の特性

寸 法	約 6 cm × 10 cm
厚 さ	2.4 μ
比 重	1.26
濃 縮 度	93.5%
<sup>235</sup> U濃度	2.0%
面 密 度	3.5 mg 全重量/cm <sup>2</sup> 0.67 mg <sup>235</sup> U/cm <sup>2</sup>

###### (2) 壓力反応容器

反応容器は図4、図5に示すようなステンレス鋼製の円筒で、反応ガスは容器中心から入り、周囲の燃料体から照射されて外部に出る。燃料体をとりまく圧力容器外壁は外部冷却される。

##### 3-1-3 热設計

3-1-2で示したような燃料体一単位当たりの発熱量は、次のようなになる。

$$\text{燃料体面積 } S = 6.0 \times 10^{-3} [\text{m}^2]$$

$$\text{体積 } V_f = 1.44 \times 10^{-8} [\text{m}^3]$$

$$\text{重量 } W_f = 1.82 \times 10^{-4} [\text{kg}]$$

$$\text{<sup>235</sup>U重量 } W_{f'} = 3.38 \times 10^{-5} [\text{kg}]$$

$$\text{熱中性子束 } \phi = 5 \times 10^{19} [\text{n/cm}^2 \text{ sec}]$$

$$\text{核分裂出力 } P = 4.76 \times 10^{-11} \times W_f' \times \phi = 0.081 [\text{kWatt}] \quad (23a)$$

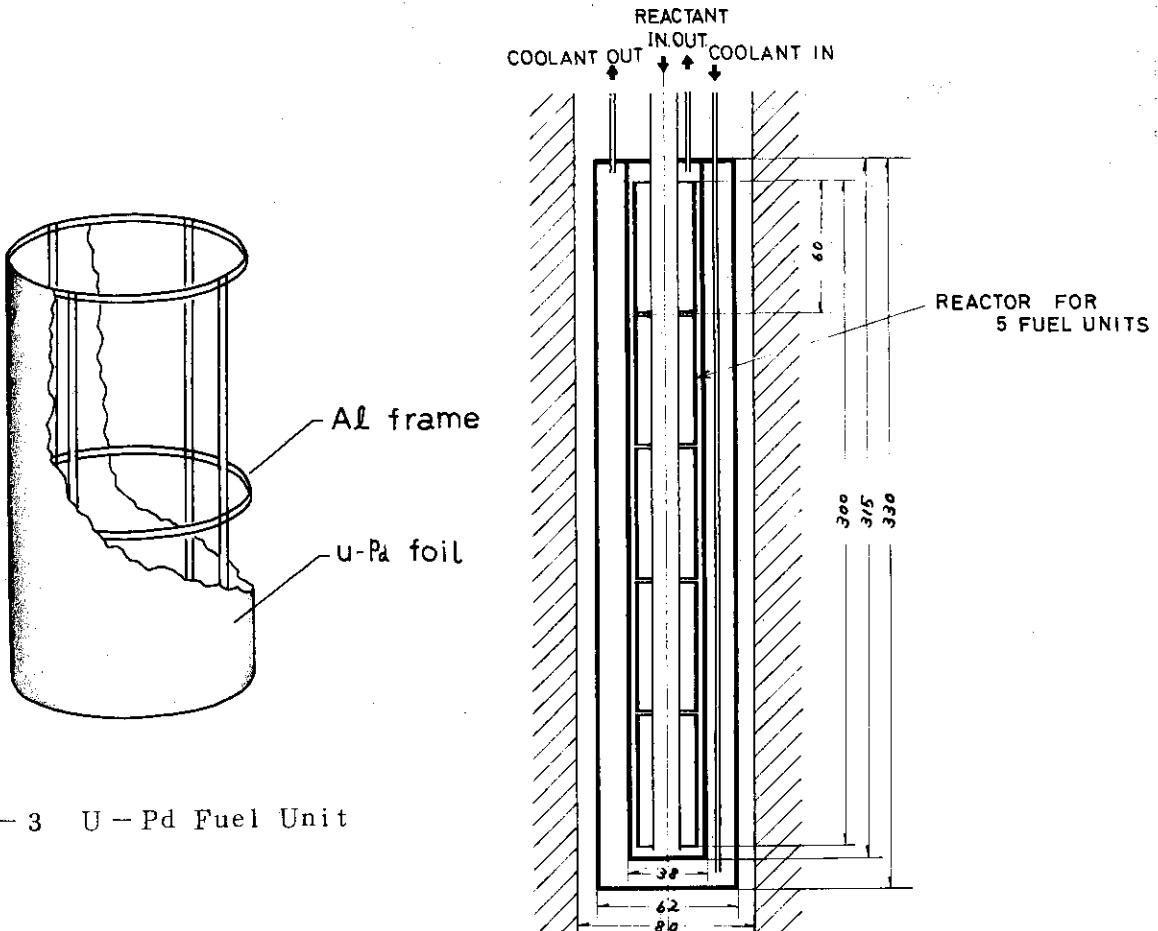
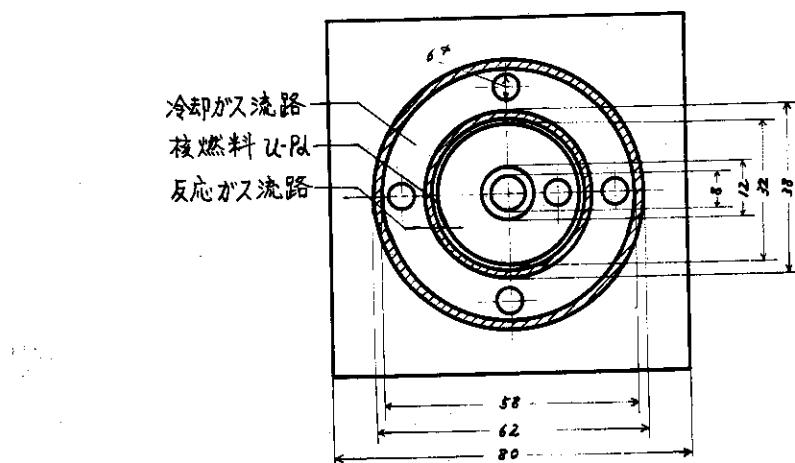


図-3 U-Pd Fuel Unit

図-4 反応容器 縦断面図  
(寸法, mm)図-5 反応容器 横断面図  
(寸法, mm)

燃料体及びそれに接した容器壁付近での発熱量は、

$$\begin{aligned} Q_1 &= P \times 0.84 \times 0.75 + P \times 0.84 \times 0.25 \times \frac{1}{2} \\ &= 0.058 \text{ [kwatt]} = 50.3 \text{ [kcal/hr]} \end{aligned} \quad (24)$$

反応ガスに吸収されて発熱した量は、

$$Q_2 = P \times 0.83 \times 0.25 \times \frac{1}{2} = 0.0083 \text{ [kwatt]} = 7.2 \text{ [kcal/hr]} \quad (25)$$

これらの発生熱量 ( $Q_1 + Q_2$ ) を燃料体が熔融しないように反応器外部をガス冷却して除去する。反応温度を種々な範囲に取るために He ガス, CO<sub>2</sub> ガス, N<sub>2</sub> ガス等を冷却ガスとして用いることができる。

### (1) He ガスによる熱除去

#### (1) 反応管壁と冷却ガスとの伝熱係数

図 5 に見るように短管で 2 重管になっている場合の伝熱係数の求め方として次の式を使用する。

$D_e G / \mu_f < 2100$  で、

$$(h_{am} D_e / k) (\mu_w / \mu)^{0.14} = 1.86 (4w C_p / \pi k \ell)^{1/3} \quad (26)$$

$h_{am}$  : 算術平均伝熱温度差に基づく伝熱係数 [kcal/m<sup>2</sup> h °C]

$D_e$  : 相当直径  $D_o - D_i$  [m]

$\mu_w$  : 壁温でのガス体の粘度 [kg/m · hr]

$\mu$  : ガス体の粘度 [kg/m · hr]

w : 流体流量 [kg/h]

k : 热伝導率 [kcal/m · h · °C]

$\ell$  : 热交換長さ [m]

冷却ガス温度  $t_c = 40^\circ\text{C}$ , 壁温  $t_f = 400^\circ\text{C}$  として, w=1, 3, 8, 15 kg/h の各場合について  $h_{am}$  を求めると, 表 2 のごとくなる。

表 - 2 He 流量と温度差等の関係  
(反応管 - 冷却ガス間)

W [kg h]	$U_c$ [m sec]	Nu [-]	$h_{am}$ [kcal m <sup>2</sup> h °C]	$K^*$ [kcal mh °C]	$t_f - t_c$ [°C]	$t_{co}$ [°C]	$t_f$ [°C]
1	0.69	8.3	32.6	0.293	313	76.3	366
3	2.07	11.9	46.7	0.369	248	45.5	286
8	5.53	16.5	64.3	0.443	207	35.8	240
15	10.4	17.7	69.3	0.462	198	33.1	230

(2) 燃料体と冷却ガスの総括熱通過率  $K^*$

燃料体から冷却ガスへの熱通過量は次のように定義される。

$$Q = K^* 2\pi \ell (t_f - t_c), \quad Q = Q_1 + Q_2 \quad (27)$$

$t_f$ : 燃料体平均温度 $t_c$ : 冷却ガス平均温度

K\*は、次のように計算される。

$$\frac{1}{K^*} = \frac{1}{k_2} \ln \frac{D_3}{D_2} + \frac{1}{k_3} \ln \frac{D_4}{D_3} + \frac{1}{h_{4am} \times \frac{D_4}{2}} \quad (23)$$

 $k_2$ : 燃料体と反応管の間の熱伝導率 ( $N_2$ ) $k_3$ : 反応管壁の熱伝導率 $D_2$ : 燃料合金ばく直径 $D_3, D_4$ : 反応管内、外径(23)式から総括熱通過率  $K^*$  が求まり、また(2)式から燃料体と冷却ガスの温度差  $t_f - t_c$  が求まる。流速と燃料体の温度との関係を図 6 に示す。

## (1) 反応ガスと反応管との熱伝達

反応ガスに吸収されるエネルギーは、一部反応系に使われるが大部分は熱となり、燃料体を通り除熱される。そこで、反応ガス ( $N_2$ ) と燃料体との熱伝達係数は、前と同じようにして求められる。この際反応ガスの入口温度は各々の着目温度に予熱されているとする。ここで例えば、反応ガス温度 = 600°C, 30 atm と仮定すると、反応ガスと燃料体の温度差  $t_r - t_f$  の反応ガス流速  $U_r$  との関係は図 7 のような関係となる。代表的数値を表 3 に示す。

(2)  $CO_2$  ガスによる冷却

これも同じように計算すると表 4 の如くなる。

(3)  $N_2$  ガスによる冷却

同様に計算して表 5 の結果を得る。

表 - 3 反応ガス流量と温度差等の関係  
(反応ガス ( $N_2$ , 600°C, 30 atm) - 反応管間)

$U_r$	$W$	$Nu$	$h_{2am}$	$t_r - t_f$
[ $\frac{cm}{sec}$ ]	[ $\frac{kg}{h}$ ]	[ $-$ ]	[ $\frac{kcal}{m^2 h C}$ ]	[ $^{\circ}C$ ]
1	$7.93 \times 10^{-2}$	4.07	30	40
5	$3.97 \times 10^{-1}$	6.95	51.2	23.4
10	$7.93 \times 10^{-1}$	8.85	65	18.5

表 - 4 冷却ガス  $CO_2$  流量と温度差等の関係

$W$	$U_c$	$Nu$	$h_{4am}$	$K^*$	$t_f - t_c$	$t_{co}$	$t_f$
[ $\frac{kg}{h}$ ]	[ $\frac{cm}{sec}$ ]	[ $-$ ]	[ $\frac{kcal}{m^2 h C}$ ]	[ $\frac{kcal}{m h C}$ ]	[ $^{\circ}C$ ]	[ $^{\circ}C$ ]	[ $^{\circ}C$ ]
5	0.38	1.6	7.42	0.0873	1050	85.5	1108
14.2	1.07	2.28	10.5	0.119	770	50.0	810
20	1.50	2.54	11.8	0.132	693	43.7	730
30	2.15	2.91	14.5	0.157	582	39.2	627
60	4.50	3.7	17.2	0.181	505	34.6	537
100	7.50	4.33	20.1	0.205	447	32.8	478

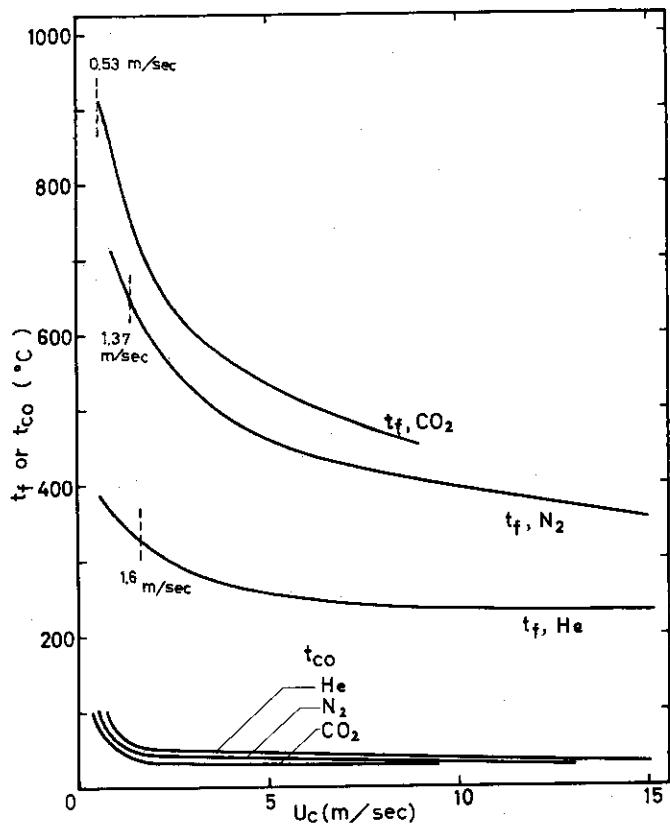


図-6 燃料体温度 ( $t_f$ ) , 冷却ガス反応器出口温度 ( $t_{CO}$ )  
と冷却ガス流速 ( $U_c$ ) の関係

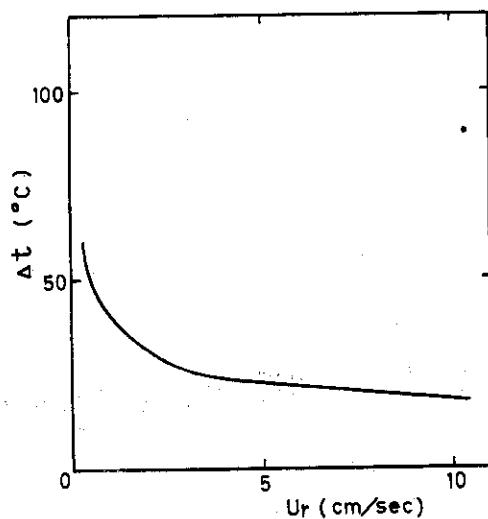


図-7 反応ガスと燃料体の平均温度差 ( $\Delta t$ ) と反応ガス  
流速 ( $U_r$ ) の関係  
 $N_2$ ガス, 30 atm,  $\ell = 10$  cm

表-5 冷却ガス  $N_2$  流量と温度差等の関係

W [kg/h]	$U_c$ [m/sec]	Nu	$h_{4am}$ [kcal/m <sup>2</sup> h°C]	$K^*$ [kcal/mh°C]	$t_f - t_c$ [°C]	$t_{co}$ [°C]	$t_f$ [°C]
10	1.18	18.6	13.2	0.145	630	531	672
20	2.37	23.4	16.5	0.174	527	41.5	563
30	3.55	27.0	19.0	0.196	467	37.7	501
60	7.1	33.9	24.0	0.235	390	33.8	442
120	14.2	42.7	30.2	0.275	332	31.9	363

以上の三種類のガス冷却の場合の計算結果を図示すれば、図8のようになる。

#### (4) 冷却ガス出口温度

反応器入口での冷却ガス温度  $t_{ci} = 30^\circ\text{C}$ としたとき、反応器出口温度  $t_{co}$  は次の(20)式によつて計算される。

$$Q = WC_p(t_{co} - t_{ci}), \quad Q = Q_1 + Q_2 \quad (20)$$

結果を、  $t_f$ と共に図6に示した。

### 3-1-4 操作範囲

#### (1) 壓力

反応ガスの圧力は核分裂片エネルギー有効利用の観点から30気圧とする。このガス圧と反応容器の寸法においては、核分裂片のエネルギーは燃料体からでたものはすべて反応ガスに吸収される。但し、反応管の寸法を変えることにより、低い圧力でも操作は可能である。

#### (2) 温度

図8から判るように、冷却ガス出口温度を  $50^\circ\text{C}$  におさえることにより、それぞれの冷却ガス流量の最低値は決定される。それ故、たとえば He 冷却の場合は反応ガス温度は最高  $350^\circ\text{C}$  におさえられる。これより高温の反応ガス条件を得たい時は反応管に断熱材を巻くか、冷却ガスを変えればよい。しかし断熱材を使用すると断熱材自体の耐用温度に限界があるのと、断熱材料を正確に決定することが困難であり、操作範囲も狭まるのが、冷却ガスの種類による温度調節と比較したときの欠点であると思われる。それぞれの場合の温度範囲をあげると次のようになる。

He ガスによる冷却  $200^\circ\text{C} \sim 350^\circ\text{C}$

$N_2$  ガスによる冷却  $400^\circ\text{C} \sim 680^\circ\text{C}$

$CO_2$  ガスによる冷却  $500^\circ\text{C} \sim 1000^\circ\text{C}$

ただし、スイミングプール型の炉においては、水の比熱が大きいので反応ガス出口管附近の温度はあまり変わらないと考えれば、He ガスだけでもっと広い温度範囲がとれるであろう。しかし He ガス冷却で小流量の場合、温度調節はかなり難しくなることが予想される。

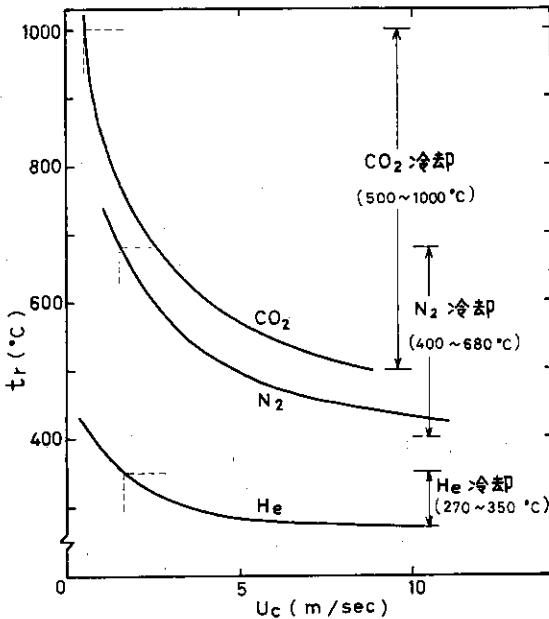


図-8 反応ガス ( $\text{N}_2$ ) の流速  $U_r = 1 \text{ cm/sec}$  の時の冷却ガス流速 ( $U_c$ ) と反応ガス温度 ( $t_r$ )

各曲線上に冷却ガス出口温度を  $50^\circ\text{C}$  に保てる時の最小流速と反応ガス温度の位置を示した。

$$\text{即ち } 0.53 \text{ m/sec } \text{CO}_2 \rightarrow t_r = 1000^\circ\text{C}$$

$$1.37 \text{ m/sec } \text{N}_2 \rightarrow t_r = 680^\circ\text{C}$$

$$1.6 \text{ m/sec } \text{He} \rightarrow t_r = 350^\circ\text{C}$$

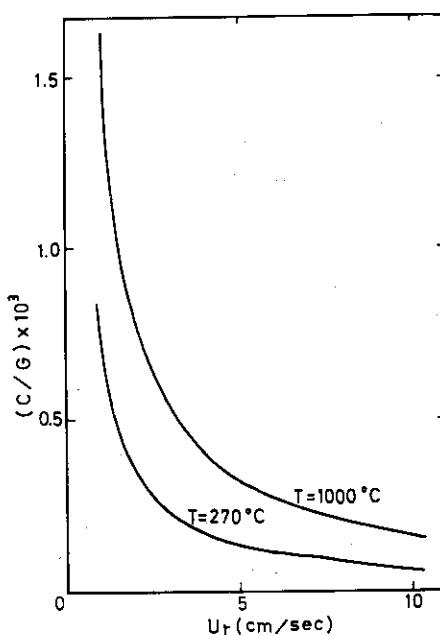


図-9 外部冷却型反応器の反応収率と反応ガス流速

## ④ 流量

反応ガスの流量は分析可能な収率の範囲によって決められる。

### 3-1-5 反応生成物の収率

反応生成物の収率は、2-4で述べた計算法により、(19)式に下のような値を入れて  $U_r$  と (C/G) の関係として表わせる。

$$C = \frac{M.P.}{M.F.} = 3.40 \times 10^{-16} \frac{G E_{SG} g \phi T}{A U P}$$

ただし

$$E_{SG} = 0.125, \quad g = 0.0338 \text{ g}, \quad \phi = 5 \times 10^{13} \text{ dy/cm}^2 \cdot \text{sec},$$

$$A = 1.88 \text{ cm}^2, \quad P = 30 \text{ atm}, \quad T = 543^\circ\text{K} \sim 1273^\circ\text{K}$$

計算結果を図9に、主な値を次に示す。

ただし、 $U_r$  は反応ガス流速、Cは反応ガス中の生成物モル分率である。

$U_r \text{ cm/sec}$	$\frac{C}{G} (T = 543^\circ\text{K})$	$\frac{C}{G} (T = 1273^\circ\text{K})$
1	$6.9 \times 10^{-4}$	$1.62 \times 10^{-3}$
3	$2.3 \times 10^{-4}$	$5.41 \times 10^{-4}$
5	$1.38 \times 10^{-5}$	$3.25 \times 10^{-4}$
10	$6.9 \times 10^{-5}$	$1.62 \times 10^{-4}$

### 3-2 内部冷却型反応器

#### 3-2-1 反応器の形状と発熱量

開発的な研究に重点を置いたやや大型の反応器を考える場合、反応ガスとは別に冷却ガスを流すよりも、反応ガス自体が燃料体の冷却を行うような反応器が考えられる。このような内部冷却型反応器としては、図10のような2種類の構造を考えることとする。

発熱量の計算は、2-1の(2), (3)式および3-1-3の(24), (25)式をもとにして行うことができる。

#### 3-2-2 热計算

##### i) Type-I

前述の燃料板を用い、燃料の平均温度、反応ガス出口温度を計算すると次の様になる。ただし、ガス入口温度  $t_{01} = 400^\circ\text{C}$  とする。

反応管有効長  $L = 0.3 \text{ [m]}$

伝熱面積  $S = \ell \times L \times 2 \times (\ell/d) \text{ [m}^2]$

燃料体積  $V_f = 2.5 \times 10^{-6} \times \ell \times L \times (\ell/d) \text{ [m}^3]$

$^{235}\text{U}$  重量  $W_f' = 0.98 \times 0.2 \times 1.26 \times 10^8 V_f \text{ [kg]}$

反応管容積  $V_r = \ell^2 \times L \text{ [m}^3]$

平板の乱流熱伝達率  $\alpha$  [kcal/m<sup>2</sup>·hr·deg] ≈ 総括熱伝達率

$$\alpha = 0.037 \frac{k_a}{L} \left( \frac{U_0 L}{\nu_a} \right)^{0.8} \left( \frac{\nu_a}{a_a} \right)^{1/3} \quad (30)$$

$U_0$  : ガス線速度 [m/sec]

サフィックス a : ( $t_w + t_0$ ) / 2 における物性値

$\nu_a$  : 動粘性係数 [m<sup>2</sup>/sec]

$a_a$  : 流体の温度伝導率 [m<sup>2</sup>/sec]

$k_a$  : 流体の熱伝導率 [kcal/m·hr·deg]

$$\text{反応ガス出口 - 入口温度差} : \Delta t_0 = (P_f V_f + P_r V_r) / c_0 w_0 \quad (31)$$

$$\text{燃料平均温度} : \bar{t}_w = \bar{t}_0 + (P_f v_f / S \alpha) \quad (32)$$

$c_0$  : 反応ガスの定圧比熱 [kcal/kg·deg]

$w_0$  : 反応ガスの重量流量 [kg/hr]

$$v_f = V_f / (\ell/d)$$

ここで ( $\ell/d$ ) は可変としたが、F.F. のうち軽いものは 30 atm で、約 8 m の飛程をもつので、( $\ell/d$ ) とともに内圧をかけて、F.F. の燃料への再突入を防ぐ方が望ましい。反応ガス流速  $U_0$  に対して燃料体温度  $t_w$  とガス出口温度  $t_0$  の変化のありさまを図 11 に示す。温度に対しては、( $\ell/d$ ) はほとんど影響しないため図中の曲線は  $\ell/d = 5$  を中心に相当広範囲にあてはまる。

#### □ Type-2

これは Type-1 に対して、反応ガスでの出力密度をあげた極限の状態であると考えることができる。熱伝達率  $\alpha$  は Type-1 と同じものを使用しているが、実際には端末効果があり、平板の式が厳密には使えないということのためにおよその目安を与えるにすぎない。又、一辺 2 mm の 6 角柱を one path としているが、燃料から自由に反応ガス中に F.F. を放出する立体角が、実際には  $4\pi$  となっていないためにも計算値としての信頼性は低い。Type-1 と全く同様に計算した結果を図 11 に示す。

### 3-2-3 生成物濃度

一回通過当たりどれ位の濃度の収量が得られるかを計算するために流量を分子数で表わすと、

$$\text{流量} = 6.023 \times 10^{23} \times (273/T) \times A U_0 P / (22.4 \times 10^8) \quad [\text{sec}^{-1}] \quad (33)$$

となる。但し、A は流路断面積 [m<sup>2</sup>] ;  $U_0$  は流速 [m/sec] ; P は管内圧力 [気圧] ; T はガス温度 [°K] である。反応ガス中の出入密度を  $P_r$  [eV/m<sup>3</sup> sec] でとると反応速度は、次の(34)式のようになる。

$$\text{反応速度} = G \times P_r \times V_r / 100 \quad [\text{sec}^{-1}] \quad (34)$$

したがって、濃度 C はこの逆比で求められ、

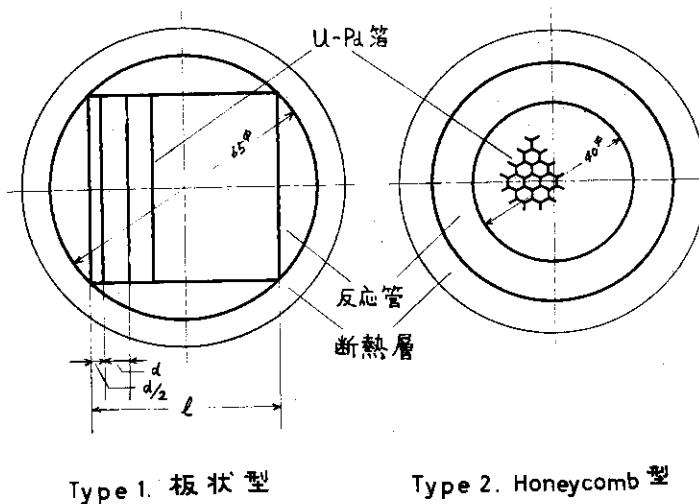
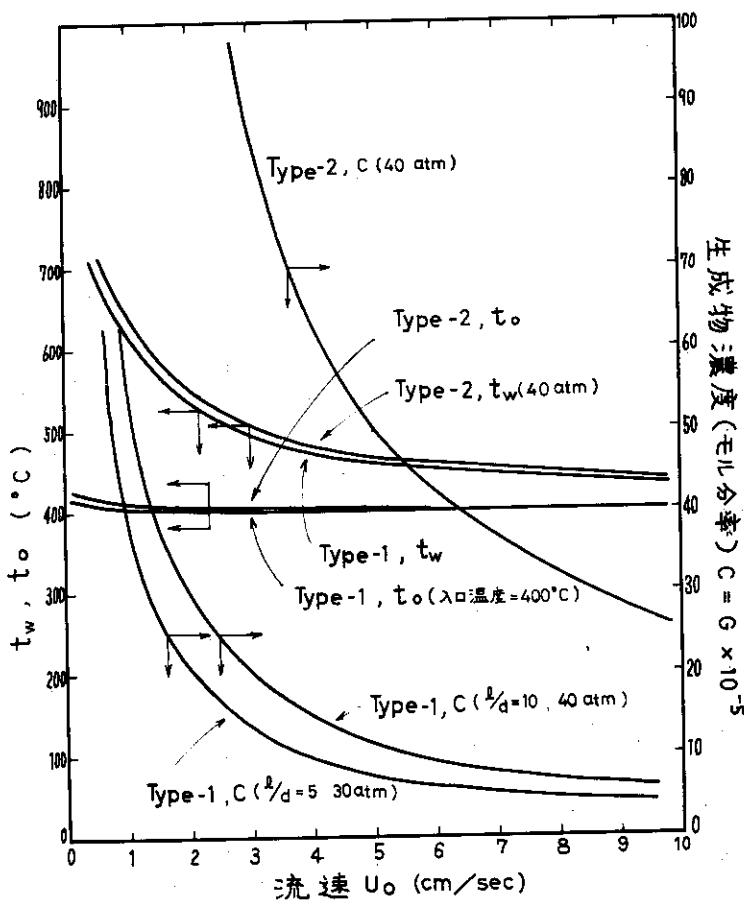


図-10 内部冷却型反応器

図-11 内部冷却型反応器の燃料温度 ( $t_w$ )、ガス  
出口温度 ( $t_o$ ) 及び生成物濃度 ( $C$ )

$$C = 1.36 \times 10^{-24} \frac{GP_r V_r T}{AU_0 P} \quad (35)$$

となる。

温度と生成物濃度の関係を、流速  $U_0$  をパラメーターとして計算した結果を図 11 に示す。

### 3-3 核分裂生成物生成量

流動ループの反応系では、反応系が直接に核燃料に接しているし、又、燃料体が非常に薄いので、気体状 F.P. は最終的にはほとんど 100% 反応系に放出されると見てよい。問題核種を  $Kr$ ,  $Xe$ ,  $I$  に限って考える。問題核種のデータを表 6 に示す。

炉運転中の各瞬間に、核分裂収率で示される割合で F.P. が生成されてゆく。生成したと同時に、それぞれの F.P. はその崩壊定数に従って崩壊してゆく。核種の蓄積は次式に示される。

$$\frac{dN}{dt} = v - \lambda N \quad (36)$$

$N$  : 着目核種量 (個数、重量、等)

$\lambda$  : 崩壊定数

$v$  : 着目核種生成率

$$v = y \times F \quad (37)$$

$y$  : fission yield

$F$  : fission rate

$$F = V_A \Sigma_f \phi \\ = 1.48 g\phi \quad (38)$$

ただし、 $V_A$  : 燃料体積 [ $cm^3$ ]

$\Sigma_f$  : マクロ核分裂断面積 [ $cm^{-1}$ ]

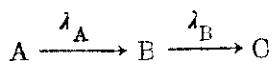
$\phi$  : 热中性子束 [ $n/cm^2 \cdot sec$ ]

$g$  :  $^{235}U$  [g]

(36) 式を解くと、

$$N = \frac{v}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (39)$$

$$\lambda t \rightarrow \infty, \quad N = \frac{v}{\lambda}.$$



で崩壊してゆく時は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_A}{dt} &= v - \lambda_A N_A \\ \frac{dN_B}{dt} &= \lambda_A N_A - \lambda_B N_B \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

表-6 着目核種のデータ (Nucl. Eng. Handbook, p.11-12)

核種	原子番号	質量数	F.Y.	半減期
B <sub>r</sub>	35	83	0.48	2.3 h
K <sub>r</sub>	36	83m		114 m
K <sub>r</sub>	36	83		安 定
K <sub>r</sub> ↓20% K <sub>r</sub> ↓ →R.b	36 80%	85m	1.5	4.36 h
K <sub>r</sub>	36	85		10.57 y
B <sub>r</sub>	35	87	2.7	55 s
K <sub>r</sub>	36	87		78 m
K <sub>r</sub> ↓ Rb	36	88	3.7	2.77 h
B <sub>r</sub>	35	89	4.8	4.51 s
K <sub>r</sub>	36	89		31.8 m
Sb	51	129	1.0	4.6 h
24% Te ↓ 7.6% Te ↓ →Te	52	129m		33.5 d
Te	52	129		74 m
I	53	129		1.7×10 <sup>7</sup> y
Sb Te ↓85% ↓15% Te Te ↓ I ↓ Xe	{ Sb:51 Te:52 52	{ 131 131 131	2.9	{ 23.1 m 30 h 25 m
I	53	131		8 d
Xe	54	131		安 定
Te	52	132	4.4	77 h
I	53	132		2.4 h
Xe	54	132		安 定
I	53	133	6.5	20.5 h
Xe	54	133		5.27 d
Cs	55	133		安 定
I	53	135	6.0	6.68 h
30% Xe ↓ 70% Xe ↓ →Xe	54	135m		15.6 m
Xe	54	135		92 h
Cs	55	135		2.1×10 <sup>6</sup> y

$$\left. \begin{aligned} N_A &= \frac{v}{\lambda_A} (1 - e^{-\lambda_A t}) \\ N_B &= \frac{v}{\lambda_B - \lambda_A} \left\{ (1 - e^{-\lambda_A t}) - \frac{\lambda_A}{\lambda_B} (1 - e^{-\lambda_B t}) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

求めるキュリー数は  $\frac{\lambda N}{3.7 \times 10^{16}}$  ( $\lambda$  は  $\frac{1}{1000}$ ,  $N$  は個) で示される。

例として、5.000W, 20日間照射, F.P. 100% 放出の場合の着目核種の蓄積を調べる。20日は着目核種の親核種等の半減期に比べて、全般的に長い。従って表中の Fission Field をそのまま使用してよいことになる。

$$5.000W \rightarrow 1.55 \times 10^{14} \text{ fissions/sec.}$$

ところで求める Curie 数は、

$$\frac{\lambda N}{3.7 \times 10^{16}} = \frac{v}{3.7 \times 10^{16}} \text{ Curies.} \quad (v: \text{個/sec})$$

$$\begin{aligned} K_r \quad y &= (0.48 + 1.5 + 0.3 + 2.7 + 3.7) \times 10^{-2} \\ &= 8.68 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

$$C(K_r) = 364 \text{ Curies}$$

$$\begin{aligned} Xe \quad y &= (0.03 + 0.16 + 6.5 + 2.1 + 6.2) \times 10^{-2} \\ &= 14.96 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

$$C(Xe) = 627 \text{ Curies}$$

$$I \quad y = (1.0 + 2.9 + 4.4 + 6.5 + 6.0) \times 10^{-2}$$

$$C(I) = 872 \text{ Curies}$$

$$C(^{181}\text{I}) = 121 \text{ Curies}$$

温度 T [°K], 壓力 P [気圧], 体積 V [cm³], 断面積 A [cm²] の反応器中を線速度 U [cm/sec] で通った反応ガスが、常温常圧で単位体積中に保有する着目核種の濃度 w [個/cm³] は次式のようになる。

$$w = \frac{y' \times F}{V'} = y' \times F \sim \frac{T}{P \times 293 \times V} = \frac{y' F T}{293 P U A} \quad [\text{個}/\text{cm}^3] \quad (42)$$

$y'$ : 核分裂収率 [個/fission]

F : 核分裂速度 [fission/sec]

$$F = V \Sigma_f \phi$$

$$= V N \sigma_f \phi$$

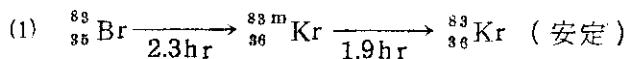
$$= \frac{0.602 \times 10^{24}}{235} g \sigma_f \phi \quad (43)$$

$V'$ : 体積流量 [cm³/sec]

$$V' = A \cdot U$$

ただし,  $g$  :  $^{235}\text{U}$  g 数,  $\sigma_f$  :  $^{235}\text{U}$  核分裂断面積,  $\phi$  : 热中性子束

プロセスガスが反応容器を流出してからの  $t$  時間後の着目核種量を求めるとき, 以下の様になる。

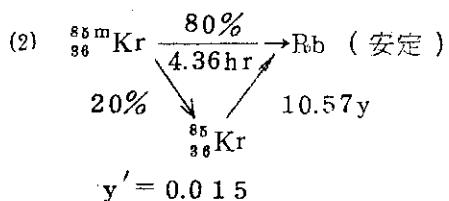


$$y' = 0.0048$$

$$\lambda_{\text{Br}} = \frac{0.693}{2.3} = 0.301 [1/\text{hr}]$$

$$\lambda_{\text{Kr}} = \frac{0.643}{1.9} = 0.365 [1/\text{hr}]$$

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{Kr}} N_{\text{Kr}} &= \frac{\lambda_{\text{Kr}} \lambda_{\text{Br}}}{\lambda_{\text{Kr}} - \lambda_{\text{Br}}} (e^{-\lambda_{\text{Br}} t} - e^{-\lambda_{\text{Kr}} t}) w_1 \\ &= 1.71 w_1 (e^{-0.301 t} - e^{-0.365 t}) \end{aligned}$$



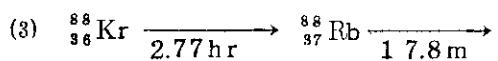
$$\lambda_{\text{Kr } 85m} N_{\text{Kr } 85m} = w_2 \lambda_{\text{Kr } 85m} e^{-\lambda_{\text{Kr } 85m} t}$$

$$\lambda_{\text{Kr } 85m} = \frac{0.693}{4.36} = 0.159 \text{ 1/hr} = \lambda_{21}$$

$$\lambda_{22} N_{22} = \frac{0.2 \lambda_{21} \lambda_{22}}{\lambda_{22} - \lambda_{21}} w_2 (e^{-\lambda_{21} t} - e^{-\lambda_{22} t})$$

$$\lambda_{22} = \lambda_{\text{Kr } 85} = \frac{0.693}{10.6 \times 360 \times 24} = 7.57 \times 10^{-6}$$

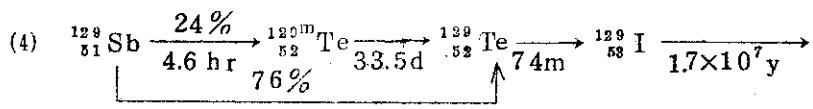
以下各項目中の核種を生成順に添字して表わす。



$$y' = 0.037$$

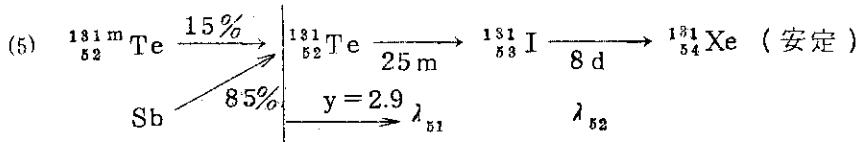
$$\lambda_{\text{Kr } 88} = \lambda_{31} = \frac{0.693}{2.77} = 0.250 \text{ 1/hr}$$

$$\lambda_{31} N_{31} = \lambda_{31} w_3 e^{-\lambda_{31} t}$$



$$y' = 0.01 \quad \lambda_{41} \quad \lambda_{42} \quad \lambda_{43} \quad \lambda_{44}$$

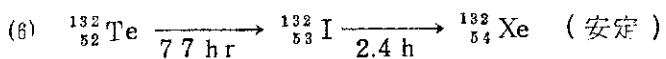
$$\lambda_{44} = \frac{0.693}{1.7 \times 10^7 \times 360 \times 24} = 4.72 \times 10^{-12} [1/\text{hr}]$$



$$\lambda_{51} = \frac{0.693 \times 60}{25} = 1.66 \quad [1/\text{hr}]$$

$$\lambda_{52} = \frac{0.693}{8 \times 24} = 3.61 \times 10^{-3} \quad [1/\text{hr}]$$

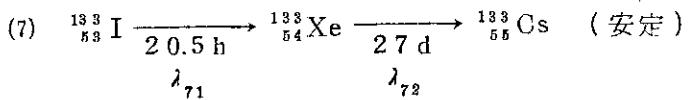
$$\lambda_{52} N_{52} = \frac{\lambda_{51} \lambda_{52} w_5}{\lambda_{51} - \lambda_{52}} (e^{-\lambda_{52} t} - e^{-\lambda_{51} t})$$



$$y' = 0.044$$

$$\lambda_{62} N_{62} = \frac{\lambda_{61} \lambda_{62} w_6}{\lambda_{62} - \lambda_{61}} (e^{-\lambda_{61} t} - e^{-\lambda_{62} t})$$

$$\lambda_{61} = \frac{0.693}{77} = 9 \times 10^{-3} \quad \lambda_{62} = \frac{0.693}{2.4} = 0.284$$

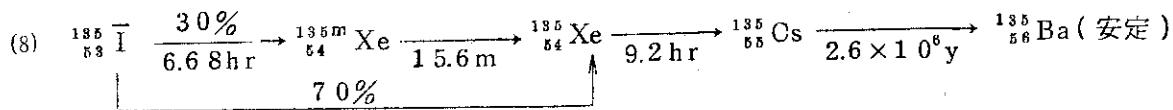


$$y' = 0.065$$

$$\lambda_{71} N_{71} = \lambda_{71} w_7 e^{-\lambda_{71} t}$$

$$\lambda_{72} N_{72} = \frac{\lambda_{71} \lambda_{72} w_7}{\lambda_{71} - \lambda_{72}} (e^{-\lambda_{72} t} - e^{-\lambda_{71} t})$$

$$\lambda_{71} = \frac{0.693}{20.5} = 3.38 \times 10^{-2} \quad \lambda_{72} = \frac{0.693}{5.27 \times 24} = 5.48 \times 10^{-3}$$



$$y' = 0.06 \quad \lambda_{81} \quad \lambda_{82} \quad \lambda_{83}$$

$$\lambda_{81} = \frac{0.692}{6.68} = 0.104$$

$$\lambda_{82} = \frac{0.693 \times 60}{15.6} = 2.67$$

$$\lambda_{83} = \frac{0.693}{9.2} = 0.0753$$

$$\lambda_{81} N_{81} = \lambda_{81} w_{81} e^{-\lambda_{81} t}$$

$$\lambda_{82} N_{82} = \frac{0.3 \lambda_{81} \lambda_{82} w_8}{\lambda_{82} - \lambda_{81}} (e^{-\lambda_{81} t} - e^{-\lambda_{82} t})$$

$$\begin{aligned} \lambda_{88} \lambda_{88} &= -\frac{0.7 \lambda_{81} \lambda_{88} w_8}{\lambda_{88} - \lambda_{81}} (e^{-\lambda_{81} t} - e^{-\lambda_{88} t}) \\ &\quad + 0.3 \lambda_{81} \lambda_{82} \lambda_{88} w_8 \left\{ \frac{e^{-\lambda_{81} t}}{(\lambda_{82} - \lambda_{81})(\lambda_{88} - \lambda_{81})} + \frac{e^{-\lambda_{82} t}}{(\lambda_{81} - \lambda_{82})(\lambda_{88} - \lambda_{88})} \right. \\ &\quad \left. + \frac{e^{-\lambda_{88} t}}{(\lambda_{81} - \lambda_{88})(\lambda_{82} - \lambda_{88})} \right\} \\ &= \lambda_{81} \lambda_{88} w_8 \left\{ \frac{\lambda_2 - 0.7 \lambda_1}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)} e^{-\lambda_1 t} + \frac{0.3 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} e^{-\lambda_2 t} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\lambda_2 - 0.7 \lambda_3}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} e^{-\lambda_3 t} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w &= \frac{y' F}{V'} = \frac{y' T}{293 \text{ PUA}} \cdot \frac{0.602 \times 10^{24}}{235} \times 577 \times 10^{-24} \times g \phi \\ &= 5.05 \times 10^{-3} \frac{T g \phi}{\text{PUA}} y' \end{aligned}$$

wはyの関数で以下w=yとする。yは、%で表示する。

- 1)  $\lambda_{11} N_{11} = 0.821 (e^{-0.301t} - e^{-0.865t})$
- 2)  $\lambda_{21} N_{21} = 2.39 \times 10^{-1} e^{-0.169t}$   
 $\lambda_{22} N_{22} = 2.27 \times 10^{-6} (e^{-7.57 \times 10^{-6}t} - e^{-0.169t})$
- 3)  $\lambda_{31} N_{31} = 9.25 \times 10^{-3} e^{-0.25t}$
- 5)  $\lambda_{52} N_{52} = 1.05 \times 10^{-2} (e^{-8.61 \times 10^{-3}t} - e^{-1.66t})$
- 6)  $\lambda_{62} N_{62} = 3.96 \times 10^{-2} (e^{-9 \times 10^{-3}t} - e^{-0.289t})$
- 7)  $\lambda_{71} N_{71} = 0.192 e^{-3.88 \times 10^{-2}t}$   
 $\lambda_{72} N_{72} = 0.0425 (e^{-5.18 \times 10^{-3}t} - e^{-1.25 \times 10^{-3}t})$
- 8)  $\lambda_{81} N_{81} = 0.624 e^{-0.104t}$   
 $\lambda_{82} N_{82} = 0.194 (e^{-0.104t} - e^{-2.67t})$   
 $\lambda_{88} N_{88} = -1.64 e^{-0.104t} + 5.49 \times 10^{-3} e^{-2.67t} + 1.64 e^{-0.0753t}$
- 9)  ${}^{87}\text{Br} \xrightarrow{55\text{s}} {}^{87}\text{Kr} \xrightarrow{78\text{m}}$

$$y = 3.7$$

$$\lambda_{91} = \frac{0.693 \times 60}{78} = 1.533$$

$$\lambda_{91} N_{91} = 1.97 \times e^{-0.589t}$$

$f(t) = \lambda N$ として図示すると図12, 図13になる。

一回過廻の時のダンプタンク中の核分裂生成物濃度を求める。ある時刻  $t_0$  でこの流動ループの運転を開始し,  $t_1$  で運転を停止し, その間に照射された全ガスをダンプタンクに一時貯蔵し,  $t_2$  でダンプタンク中の核分裂生成物の濃度を測定したとすれば, タンク中のF.P. 濃度  $C_1$  は,

$$C_1 = 3.79 \times 10^{-17} \times \int_{t_2 - t_1}^{t_2} \frac{T g \phi}{\text{PUA}} f(t) dt \quad [\text{Ci/cm}^3] \quad (44)$$

となる。

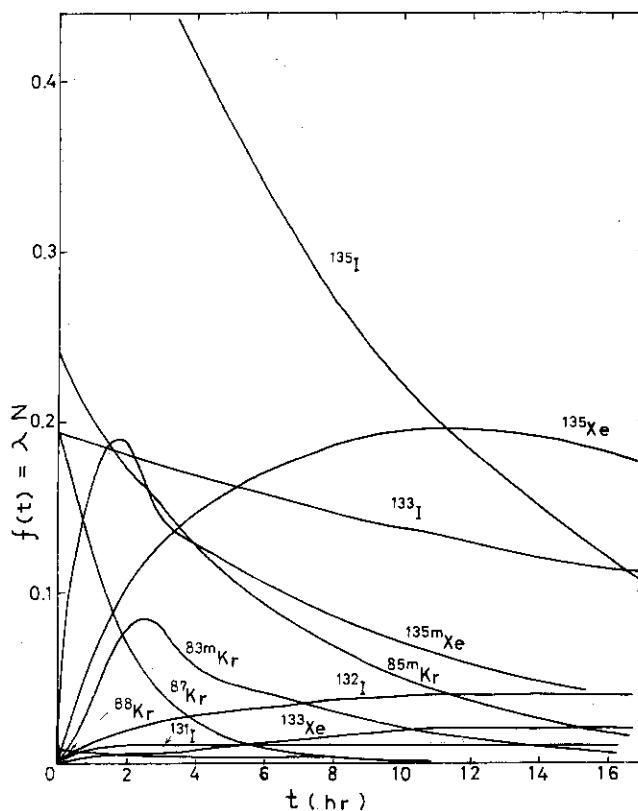


図-12 核種別 F.P. 生成量

タテ軸の値に  $3.79 \times 10^{-7} \frac{Tg\phi}{PuA}$  または  $2.36 \times 10^{-5} \text{ Ci/cm}^3$  (共に CGS 単位)

を乗じて Ci/cm<sup>3</sup> となる。t は経過時間 (hr)。 $\phi = 2.5 \times 10^{13}$ , 6 cm × 10 cm の U-Pd  
は < 5 枚使用とする。

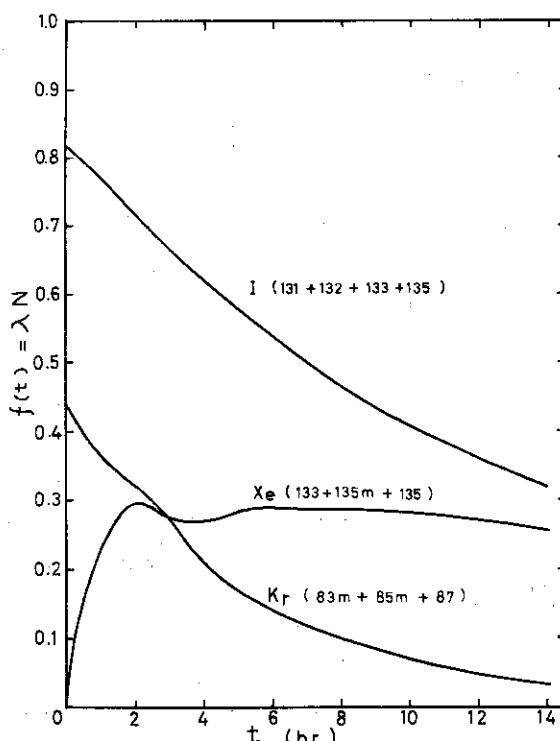


図-13 元素別 F.P. 生成量

前提、換算など前図に同じ

$f(t) = \lambda N$  は、図 12, 13 に示されている。上式は、運転中に反応器や、反応条件を変えても有効である。また、反応ガスを循環する時の核分裂生成物濃度は、(4)式のようになる。

$$C_2 = \frac{1.11 \times 10^{-14}}{V} \int_{t_1}^{t_2} g \phi f(t) dt \quad [\text{Ci/cm}^3] \quad (4)$$

ここで、V は全ループの体積である。

## 4. 流動ループの概念設計

### 4-1 設計条件

#### 4-1-1 反応ガス循環系の前提条件

##### A 反応器設計の前提または計算により定まる条件

###### (1) 反応条件

反応器で実現されるべき条件として次の事項を考える。

- I) 反応系：主として 10% 以内の  $\text{C}_2\text{H}_4$  混合の  $\text{N}_2$  のループ。
- II) 圧力：1~5 atm.
- III) 溫度：室温~400°C
- IV) 放射線：<sup>\*1)</sup>  $1 \times 10^{13} \text{ th n/cm}^2 \cdot \text{sec}$   
 $4 \times 10^{10} \text{ f.n/cm}^2 \cdot \text{sec}$   
 $3 \times 10^7 \text{ R/hr}$

###### (2) 熱的条件

反応器の発熱については前提とする flux により次のような評価が行なわれている。

- i)  $\text{Fe} \sim 0.32 \text{ watt/cm}^3 = 0.041 \text{ watt/g}$  (2.3 参照)  
 但し、 $\gamma$  flux :  $3 \times 10^{12}$  (1 MeV),  $2.4 \times 10^{12}$  (2 MeV),  $6 \times 10^{11}$  (5 MeV)  
 $\text{photon/cm}^2 \text{ sec}$

この flux を空気の吸収に換算して計算すると、 $2 \times 10^7 \text{ R/hr}$  となる。また別の flux 条件では次の値が推定された。

- ii)  $\text{Fe} \sim 0.0587 \text{ watt/cm}^3$   
 但し、 $\gamma$  flux :  $4 \times 10^{11}$  (2 MeV),  $2 \times 10^{11}$  (5 MeV),  $2 \times 10^{10}$  (8 MeV),  
 $\text{photon/cm}^2 \text{ sec}$

この flux は同様にして  $4 \times 10^6 \text{ R/hr}$  に相当する。

- iii) SUS 27  $\sim 0.2 \text{ watt/g}$  ( $\div 1.5 \text{ watt/cm}^3$ ) (LTFL 設計値)  
 但し、このときの  $\gamma$  線線量率  $\sim 9 \times 10^7 \text{ R/hr}$  相当 (JRR-3)。

\*1) JAERI-1120. p.70. Fig.3-32 によれば、現在の JRR-4 の炉心タンク表面より 10 cm 付近では、  
 $\phi_{th} \sim 2 \times 10^5 \text{ th n/cm}^2 \text{ sec/watt}$ ,  $\phi_f \sim 8 \times 10^8 \text{ fn/cm}^2 \text{ sec/watt}$ ,  $Dr \sim 6 \text{ R/hr/watt}$  である。  
 JRR-4 改造後の出力 5MW では、 $\phi_f = 4 \times 10^{10} \text{ fn/cm}^2 \cdot \text{sec}$ ,  $Dr = 3 \times 10^7 \text{ R/hr}$  になると思われる。熱中性子  
 については炉心内で水層 10cm 以上を黒鉛に置換するので、これより約 10 倍の線束になると期待され、 $\phi_{th} =$   
 $1 \times 10^{13} \text{ th n/cm}^2 \cdot \text{sec}$  になるとする。

$f(t) = \lambda N$  は、図 12, 13 に示されている。上式は、運転中に反応器や、反応条件を変えても有効である。また、反応ガスを循環する時の核分裂生成物濃度は、(45) 式のようになる。

$$C_2 = \frac{1.11 \times 10^{-14}}{V} \int_{t_1}^{t_2} g \phi f(t) dt \quad [\text{Ci/cm}^3] \quad (45)$$

ここで、V は全ループの体積である。

## 4. 流動ループの概念設計

### 4-1 設計条件

#### 4-1-1 反応ガス循環系の前提条件

##### A 反応器設計の前提または計算により定まる条件

###### (a) 反応条件

反応器で実現されるべき条件として次の事項を考える。

- I) 反応系：主として 10% 以内の  $\text{C}_2\text{H}_4$  混合の  $\text{N}_2$  のループ。
- II) 圧力：1~5 atm.
- III) 溫度：室温~400°C
- IV) 放射線：<sup>\*1)</sup>  $1 \times 10^{13} \text{ th n/cm}^2 \cdot \text{sec}$   
 $4 \times 10^{10} \text{ f.n/cm}^2 \cdot \text{sec}$   
 $3 \times 10^7 \text{ R/hr}$

###### (b) 熱的条件

反応器の発熱については前提とする flux により次のような評価が行なわれている。

- i)  $\text{Fe} \sim 0.32 \text{ watt/cm}^3 = 0.041 \text{ watt/g}$  (2.3 参照)

但し、 $\gamma$  flux :  $3 \times 10^{12}$  (1 MeV),  $2.4 \times 10^{12}$  (2 MeV),  $6 \times 10^{11}$  (5 MeV)  
 $\text{photon/cm}^2 \text{ sec}$

この flux を空気の吸収に換算して計算すると、 $2 \times 10^7 \text{ R/hr}$  となる。また別の flux  
条件では次の値が推定された。

- ii)  $\text{Fe} \sim 0.0587 \text{ watt/cm}^3$

但し、 $\gamma$  flux :  $4 \times 10^{11}$  (2 MeV),  $2 \times 10^{11}$  (5 MeV),  $2 \times 10^{10}$  (8 MeV),  
 $\text{photon/cm}^2 \text{ sec}$

この flux は同様にして  $4 \times 10^6 \text{ R/hr}$  に相当する。

- iii) SUS 27  $\sim 0.2 \text{ watt/g}$  ( $\div 1.5 \text{ watt/cm}^3$ ) (LTFL 設計値)

但し、このときの  $\gamma$  線線量率  $\sim 9 \times 10^7 \text{ R/hr}$  相当 (JRR-3)。

\*1) JAERI-1120.p.70.Fig.3-32によれば、現在の JRR-4 の炉心タンク表面より 10 cm 付近では、  
 $\phi_{th} \sim 2 \times 10^5 \text{ th n/cm}^2 \text{ sec/watt}$ ,  $\phi_f \sim 8 \times 10^8 \text{ fn/cm}^2 \text{ sec/watt}$ ,  $Dr \sim 6 \text{ R/hr/watt}$  である。  
JRR-4 改造後の出力 5MW では、 $\phi_f = 4 \times 10^{10} \text{ fn/cm}^2 \cdot \text{sec}$ ,  $Dr = 3 \times 10^7 \text{ R/hr}$  になると思われる。熱中性子  
ICについても炉心内で水層 10cm 以上を黒鉛に置換するので、これより約 10 倍の線束 IC になると期待され、 $\phi_{th} =$   
 $1 \times 10^{13} \text{ th n/cm}^2 \cdot \text{sec}$  になると予測される。

IV) その他の例で、JRR-4の実測値では 2.5MW<sup>1</sup> で運転中の K-pipe(炉心格子外側の黒鉛層中)で、黒鉛の発熱が 0.29 watt/gr, T-pipe(ほぼ同じ条件)では Al の発熱が 0.35 watt/gr, 化学線量計で測定した  $\gamma$  線線量率( th n 分 ~  $0.6 \times 10^8$  rad/hr と f·n·分 ~  $0.6 \times 10^8$  rad/hr を差引いた値で N<sub>2</sub>O 線量計によるもの, JAERI-memo 3780(1969))は  $1.1 \times 10^8$  rad/hr であった。

以上から考えて照射位置での  $\gamma$  線線量率が  $3 \times 10^7$  R/hr とすれば、 $\gamma$  線線量率は、黒鉛で  $0.29 \times \frac{3}{11} = 0.079$  watt/gr, アルミニウムで  $0.35 \times \frac{3}{11} = 0.096$  watt/gr, SUS 27 で,  $0.2 \times \frac{3}{9} = 0.067$  watt/gr, 鉄で  $0.0075 \times \frac{3}{0.4} = 0.056$  watt/gr,  $0.041 \times \frac{3}{2} = 0.062$  watt/gr, という値が得られ,  $0.06 \sim 0.07$  watt/gr Fe or  $0.47 \sim 0.55$  watt/cm<sup>3</sup>  $\cong 0.5$  watt/cm<sup>3</sup> というところが反応器位置での発熱として適当な値であろうと考えられる。

燃料体の核分裂片による発熱は、3-1-3 の (23a) 式で  $\phi = 1 \times 10^{18}$  n/cm<sup>2</sup> sec, はく 5 枚使用, として 6.7 watt となる。

反応器発熱は外部冷却材層の外側に熱遮蔽層をとると外管部も除熱の対象とする必要があり, 外径 62, 内径 58mm, 全長 380mm の体積 (= 125 cm<sup>3</sup>) と反応管, 配管の体積 300 cm<sup>3</sup> を加えて全 Fe 体積 = 425 cm<sup>3</sup> になり, 発熱を上記の如く 0.5 watt/cm<sup>3</sup> として, 反応器全発熱 = 216 watt になる。よって全発熱は  $216 + 6.7 = 283$  watt になる。

#### (e) 反応器構造, 配置

f-1, f-2, f-3 の形を基本とし, 冷却材流路の外側に約 20mm の gap をおいてここに断熱材と空間を置き, 最外側を最外管とする。(~100mm I.D., ~5mm 厚とする)。この熱遮蔽層を含めた反応器概念図を図 14 に示す。

#### B 其の他の前提条件

##### (1) 炉心, 炉室内の配置

炉室内での機器の配置は予想される機器の所要空間も考慮して表 7 の如く想定した。

以上の概略は, 図 15 配置概念図, 図 16 フロシートおよび図 17 機器配置図に示される。

##### (2) 供給・循環・取出・分析法

原料は N<sub>2</sub> と炭化水素を想定しているので, 生成物としては炭化水素, アミン, 青酸, アンモニア, ニトリルが考えられる。原料は混合タンク中に予め調合しておき, 一定流量で反応ガス循環系 (N<sub>2</sub> ループとする) へ供給する。

N<sub>2</sub> ループは接ガス部は SUS 27 製とし, 一回通過または必要に応じて循環可能とする。温度調節は全面的に He 冷却材のループ (He ループとする) の温度調節にたよる。したがって N<sub>2</sub> ループでは補助的な加熱器と水冷却器のみを設ける。

照射後のガスの取出しは流量調節弁操作による。

分析はプロセスガスクロマトグラフ, 波高分析器, 赤外線分光計を考える。分析所要量は連続分析であるから分析器の応答速度も考慮する必要があるが, 主に分析感度, 精度が問題である。一応通常の性能のものでは, ガスクロマトグラフィーと, 赤外線分光測定では 0.1~0.01 % の検出限界を持つと思われる。

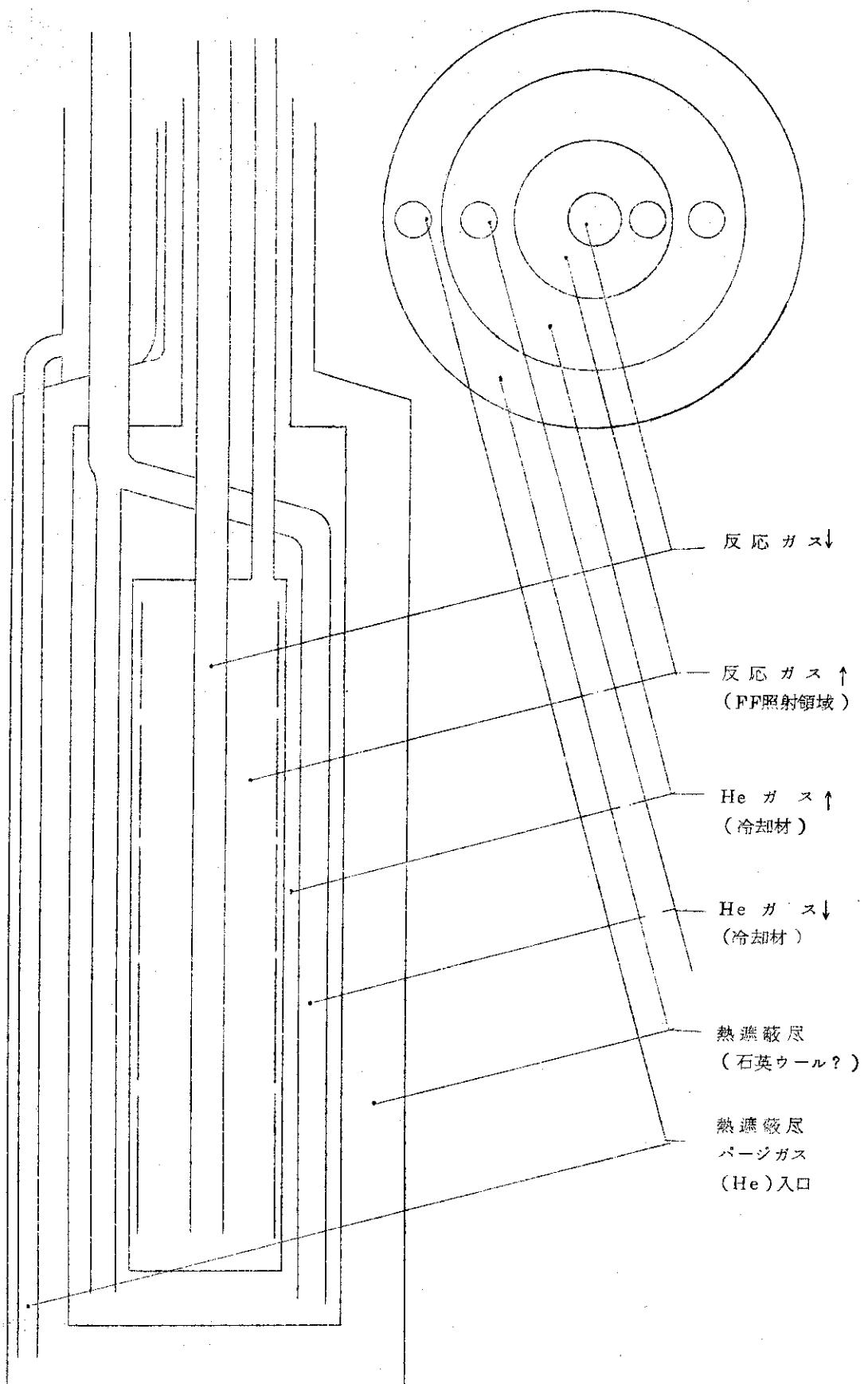


図-14  
流動ループ反応器  
構造概念図

## 機器設置棚段

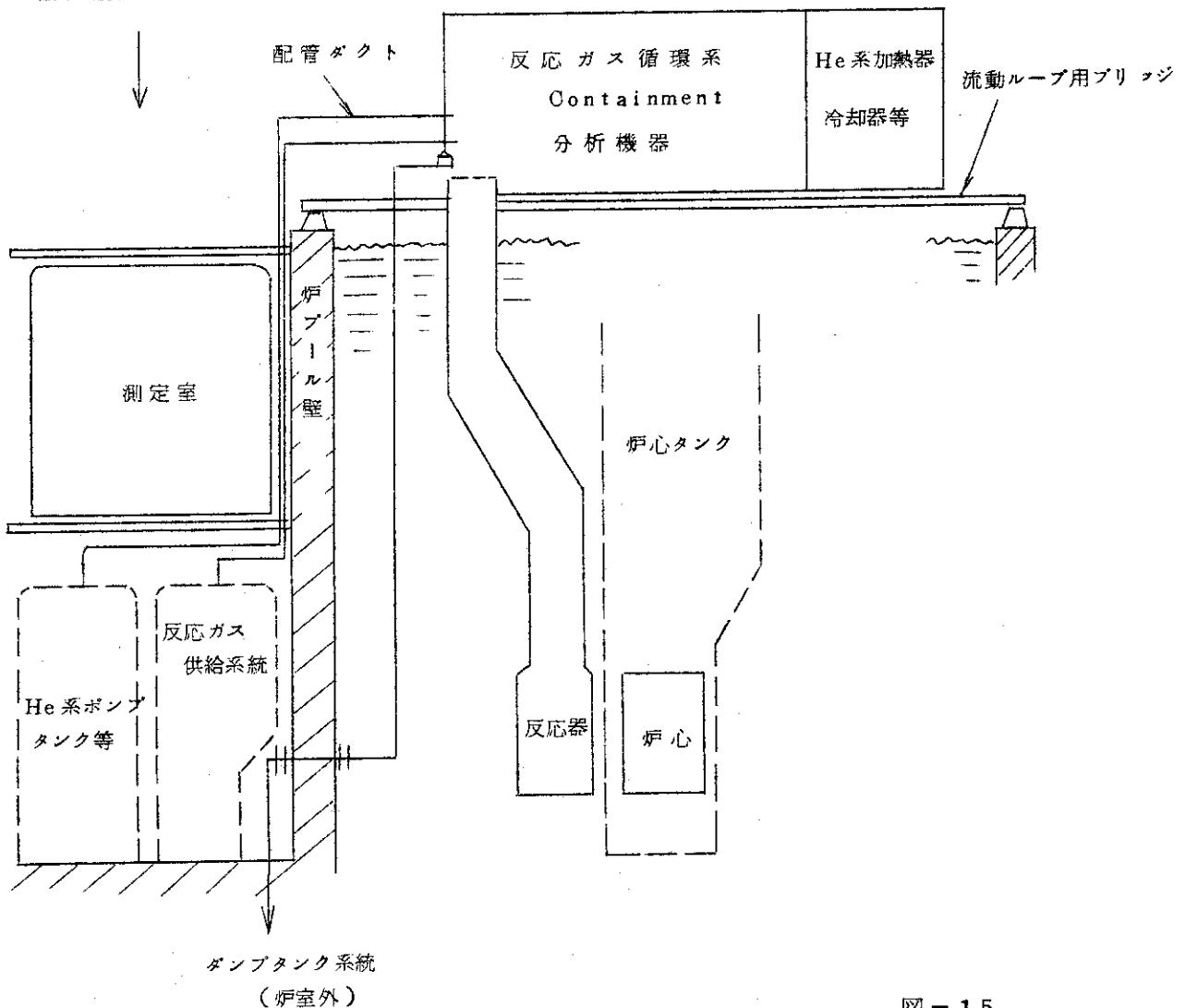


図-15

流動ループ機器  
配置概念図

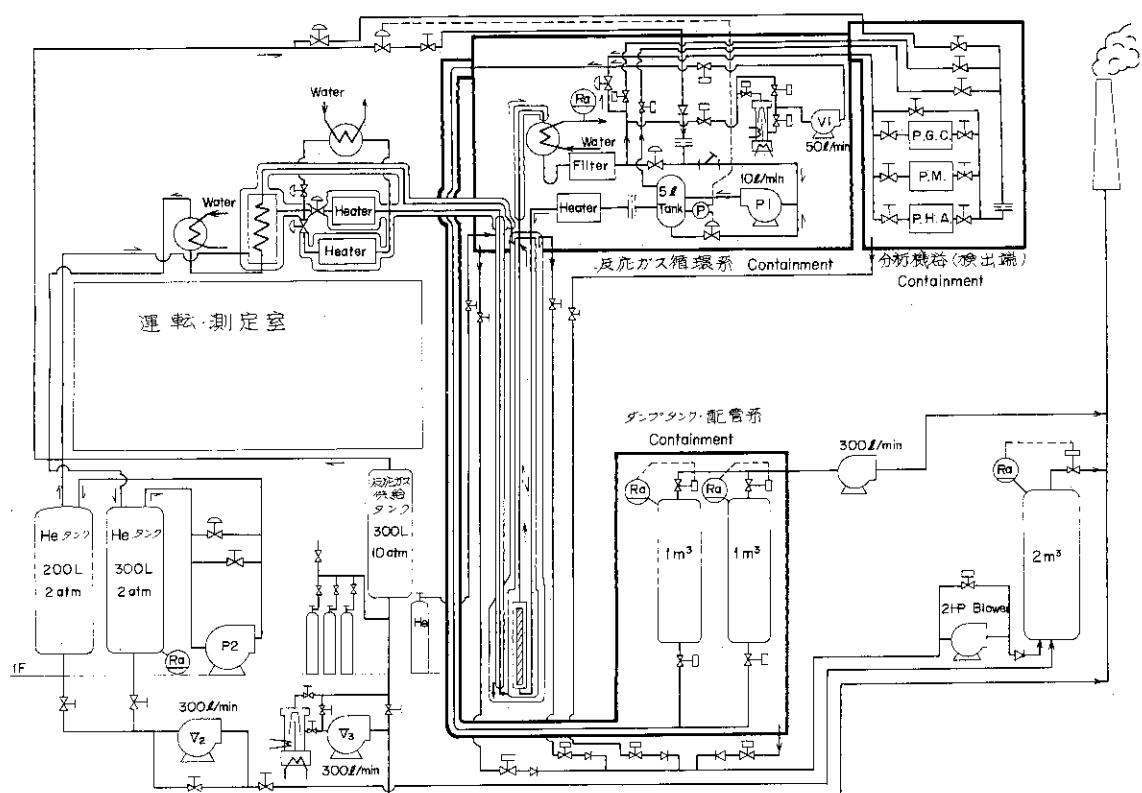


図-16 流動ループフローシート

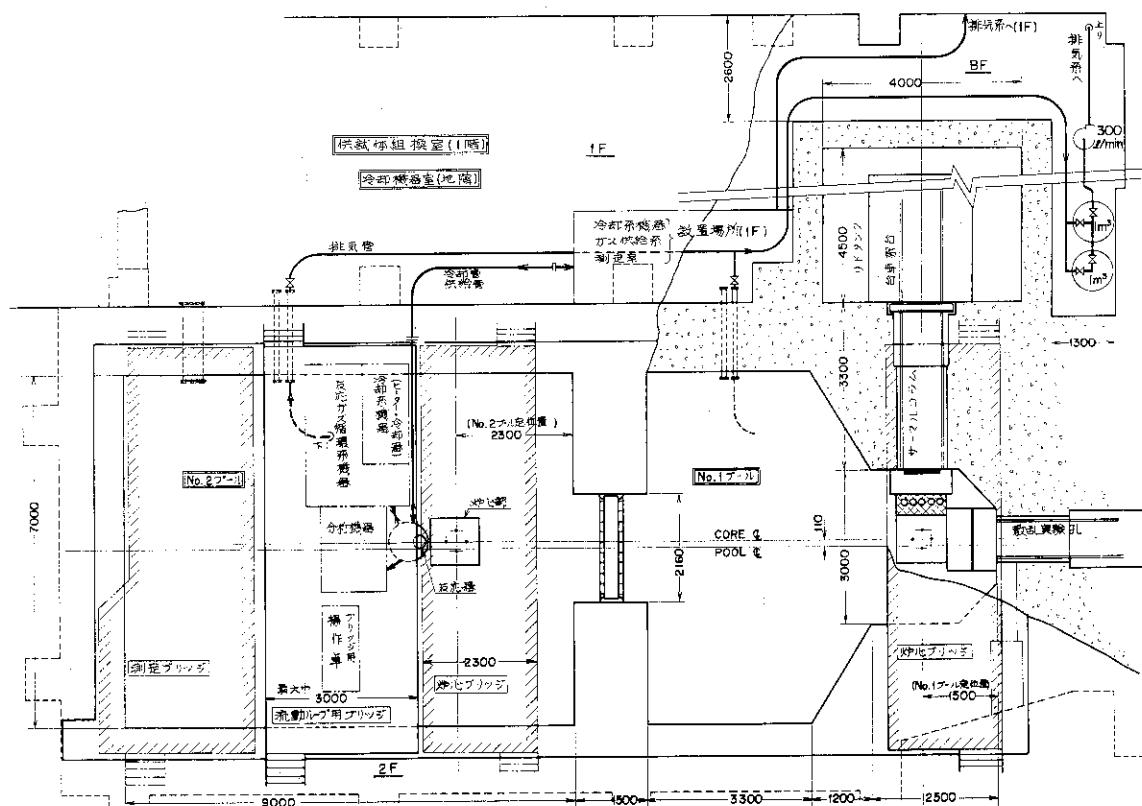


図-17 流動ループ機器配置図

表-7 主要機器配置

番号	設置位置	設置系統	
1.	プール内	反応器 同配管	
2.	プール上のブリッジ上	反応ガス循環系 同Containment 分析機器Containment	反応ガス循環ポンプ 循環系排気ポンプ 加熱器、水冷却器等 プロセスガスクロ等検出端
3	同	He 系温度調節系	熱交換器、加熱器、水冷却器等
4	棚段(中段)	分析測定器 主要操作盤	分析器本体、記録計 コントロールパネル
5	同(下段)	He 循環系 原料供給系	He 圧送機、タンク 混合タンク、排気ポンプ
6	他*	補機、ダンプタンク等	

\* 設置位置は、炉室地階東南隅、または散乱実験室壁ぎわなどが考えられる。ループ本体からは離れてよく、常時運転操作の必要がない。

#### (a) 運転形態等

原子炉は流動ループの必要に応じて運転(改造後の最大出力 5MWまで)されるとする。ループ運転の行われないときは流動ループ用ブリッジを移動させるか、または炉を停止させる。流動ループは必要に応じて 10 時間~100 時間の連続運転を行うが、標準運転形態は最長 5 時間程度とする。

#### (b) 主要機器の機能と配置

##### ① 流動ループ用ブリッジ

これは、F.P. および反応生成物の混入した高放射性、高温のガスが循環する反応ガス循環系機器、分析機器検出部および冷却系の熱交換器などを設置し得るブリッジである。

ブリッジでは、最大巾 3,000mm、最大長 8,000mm、最大重量(全負荷時) 15トンの移動式を考え、No.1 および No.2 プールのいずれにおいても実験が可能となる方式を採用する。

移動式とする理由は、原子炉運転を考えると、

④ JRR-4 の主要な利用設備が No.1 プールに集中しているため他の利用者との関連で No.2 プールでの運転を確保するのが困難である。

⑤ JRR-4 を No.1, No.2 プールと交互に運転すると、利用時間が少くなる。

という利点があるが、同時にループのみの操作を考えると、

⑥ 反応ガス系、冷却ガス系の配管の脱着が困難である。

⑦ 特に反応ガス系内の高放射性ガスによる汚染が問題である。

である。

##### ② 冷却系機器

冷却系機器のうち、He ポンプおよびタンク類は、炉室東側 1 階に、冷却器および加熱器をブリッジ上に配置する。

ブリッジから炉室 1 階までの配管は常温に近いため断熱材等の必要はない。

### ③反応ガス排気系

反応ガス循環系および分析機器からの排気はプール壁に既設の2"管(プール底より約6m)を使用し炉室地階南東の隅、または散乱実験室内に設けたダンプタンクに一時貯蔵され、濃度測定後排気塔より放出する。

ブリッジ移動時には反応ガス循環系機器の排気管前後の弁を閉塞し、ガスバージ後切離す。具体的な機器の配置は図16のフローシート及び図17の配置図で明らかである。

## 4-2 フローシートと主要設計諸元

### 4-2-1 反応ガス循環系

前述の如く $1 \sim 10 \text{ l/min}$ の反応ガス流量、 $1 \sim 10 \text{ l/min}$ の原料ガス供給(各5気圧)を標準として想定し、次の機器を有する反応ガス循環系を考えた。

#### (1)機器の特性と目的

(I)原料ガス供給口 (チェックバルブ、流量計を経た原料ガスを循環系に導入する。)

(II)ストレーナ

(III)循環ポンプ 反応ガス循環用。作動条件は常温付近、最高5気圧、最高 $10 \text{ l/min}$ (1ataで)、真空排気時と5気圧加圧時にポンプ停止、運転中共気密性が必要である。又、潤滑油蒸気の反応ガス混入がないこと、接ガス部SUS27相当の材質であることも必要。

(IV)流量調節・空気作動弁 バッファータンク(5l)圧力により、もどし流量を調節又は外部調節可能のもの。

(V)バッファータンク 容量5l、耐圧5ata、循環ポンプの脈動を消す。

(VI)流量計 循環流量の測定、 $0.3 \sim 3 \text{ l/min}$ 、 $1 \sim 10 \text{ l/min}$  2組1セット。

(VII)加熱器 He系による反応器温度調節を補完するもので、約4kW。

(VIII)反応器・同配管 反応器の入口、出口のガス温度差は $10^{\circ}\text{C}$ 以内、通常 $5^{\circ}\text{C}$ 以内の程度としたい。また核燃料温度と反応ガス温度の差も小さくする必要がある。

(IX)水冷却器 容量 $3130 \text{ kcal/hr}$ 、 $2 \text{ m}^3/\text{hr}$ 。

(X)フィルター 水冷却器の後でガスが来るからmax $70^{\circ}\text{C}$ 程度と考えられる。Absolute filter. マクロな放射性粒子除去。

(XI)流量調節弁 循環量と排出量の調節は $1 \sim 10 \text{ l/min}$ で調節可能であればよい。(排出/ $\sqrt{\text{循環量比}} \sim 0.1 \sim 1$  or 平均ガスループ回数 $10 \sim 1$ )

#### (2)設計計算

(I)熱的条件：加熱器、水冷却器の容量は次の通りである。窒素の熱容量は、 $0^{\circ}\text{C}$ で $7.0 \text{ kcal/kg-mole.deg}$ 、 $400^{\circ}\text{C}$ で $7.3 \text{ kcal/kg-mole.deg}$ であり、最大流量5atm、 $10 \text{ l/min}$ では $3 \text{ m}^3/\text{hr} = 1.34 \text{ kg-mole/hr}$ となって、 $350^{\circ}\text{C}$ のガスを $30^{\circ}\text{C}$ に冷却するためには、

水冷却器容量は

$$(7.3)(1.34)(350 - 30) = 3.13 \times 10^3 \text{ kcal/hr}$$

水の温度上昇 20°C として

$$\text{流量 } F_c = (3130) / (20) = 1600 \text{ l/hr}$$

加熱器容量は N<sub>2</sub>ガスを 30°C から 350°C にするのに要する熱量は、

$$(3130) / (0.86) = 3640 \text{ watt} \approx 4 \text{ kwatt}$$

よって 4 KW の容量が必要となる。

(ii) 反応関係 : E<sub>SG</sub> = 0.125,  $\phi_{th} = 2.5 \times 10^{18} n/cm^2 \cdot sec$  として生成物濃度は,  $C/G = 2.67 \times 10^{-3}/\eta u$ , また  $\phi_{th} = 1 \times 10^{18}$ ,  $\eta = 1$ ,  $u = 1 cm/sec$  (即ち, 流量 0.42 l/min) として  $C/G = 1.1 \times 10^{-3}$ , となるから検出限界を  $10^{-4}$  とすれば, G~0.1 のものまで検出可能である。10 回循環すれば G≈1 なら約 1% の生成物濃度となり, 反応研究には適当な流量, 反応率をカバーしているといえよう。

#### 4-2-2 ヘリウム系

前提条件より炉心部発熱は容器約 220 watt, 燃料約 70 watt の計 290 watt = 250 kcal/hr である。次の計算に示すように反応器入口, 出口のヘリウム温度差を 5°C/pass とし, 反応器出口温度 T<sub>3</sub> = 400°C, T<sub>2</sub> = 395°C となるためにはヘリウム流量 F<sub>w</sub> = 24.2 kg/hr, T<sub>1</sub> = 367.3°C, T<sub>4</sub> = 350.0°C であることが必要となる。

##### (i) 熱損失計算

i) 前提 (寸法等は図 19 の値とする) : 反応ガスの熱収支は無視する。反応器への行きの He 管の保温層を A, 帰りの He 管の保温層を B (反応ガスの予熱および保温を兼用), 各長さを 8 m, 反応器の保温層 (R) の高さ 0.4 m とし, He 管の外面温度を 400°C, 保温管内側は 40°C と仮定して熱損失を略算した。結果を表 8 に示す。

表 - 8 熱損失計算

	保温管(A)	保温管(B)	保温管(R)	
保温層 I.D. (m) O.D. (m)	0.054 0.016	0.082 0.044	0.100 0.062	
管長, H (m)	8.0	8.0	0.4	
温度差, Δt (°C)	360	360	360	
熱伝導度, k (kcal/m hr °C)	0.05	0.05	0.05	
保温層平均直径, D (m)	0.035	0.063	0.081	
伝熱面積, $A = \pi D H$ (m <sup>2</sup> )	0.879	1.583	0.102	全面積 2.56
熱損失*, $q = Ak \Delta t / L$ (kcal/hr)	832	1500	97	全熱損失 2430

\* 伝熱層厚さ, L = 0.019 (m)

$$\text{全熱損失, } q = Ak \Delta t / L = (2.56)(0.05)(360) / (0.019) \\ = 243 \times 10^3 \text{ kcal/hr}$$

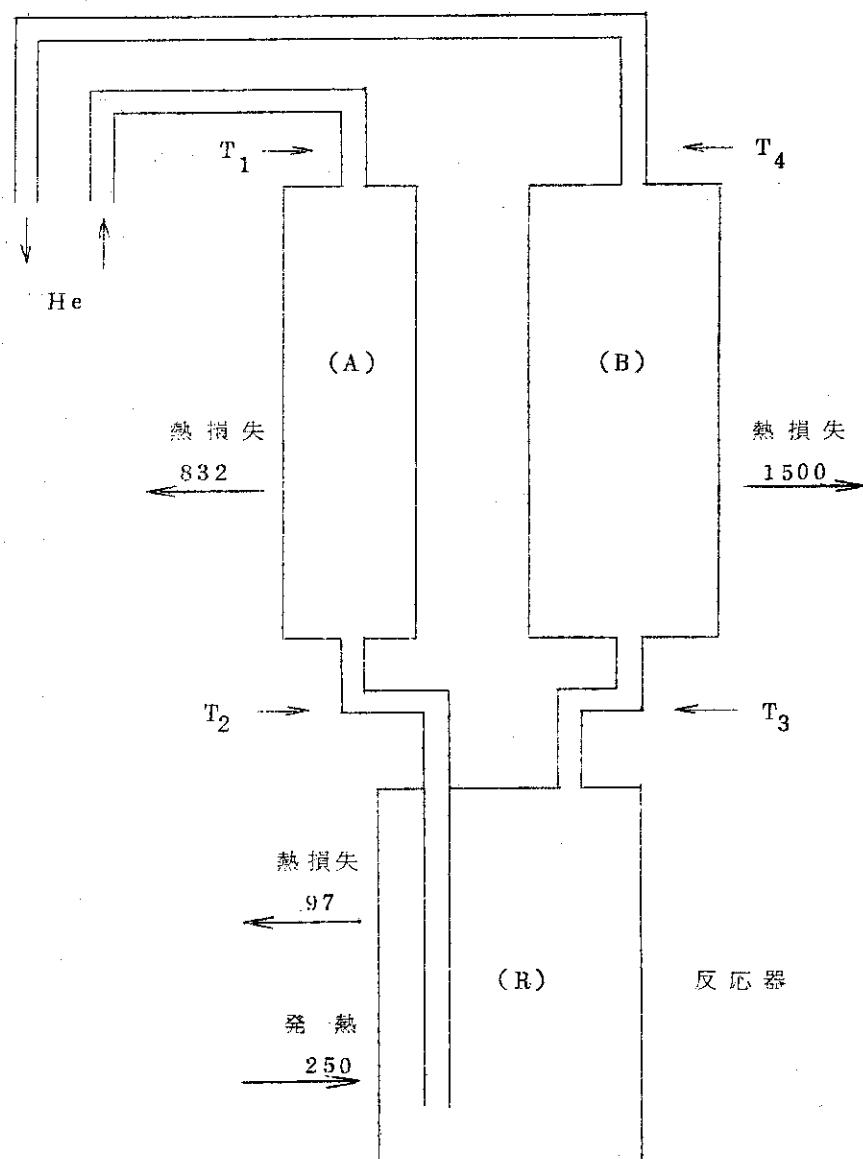


図-18 反応器、加熱器の伝熱量

(単位 Kcal/hr.)

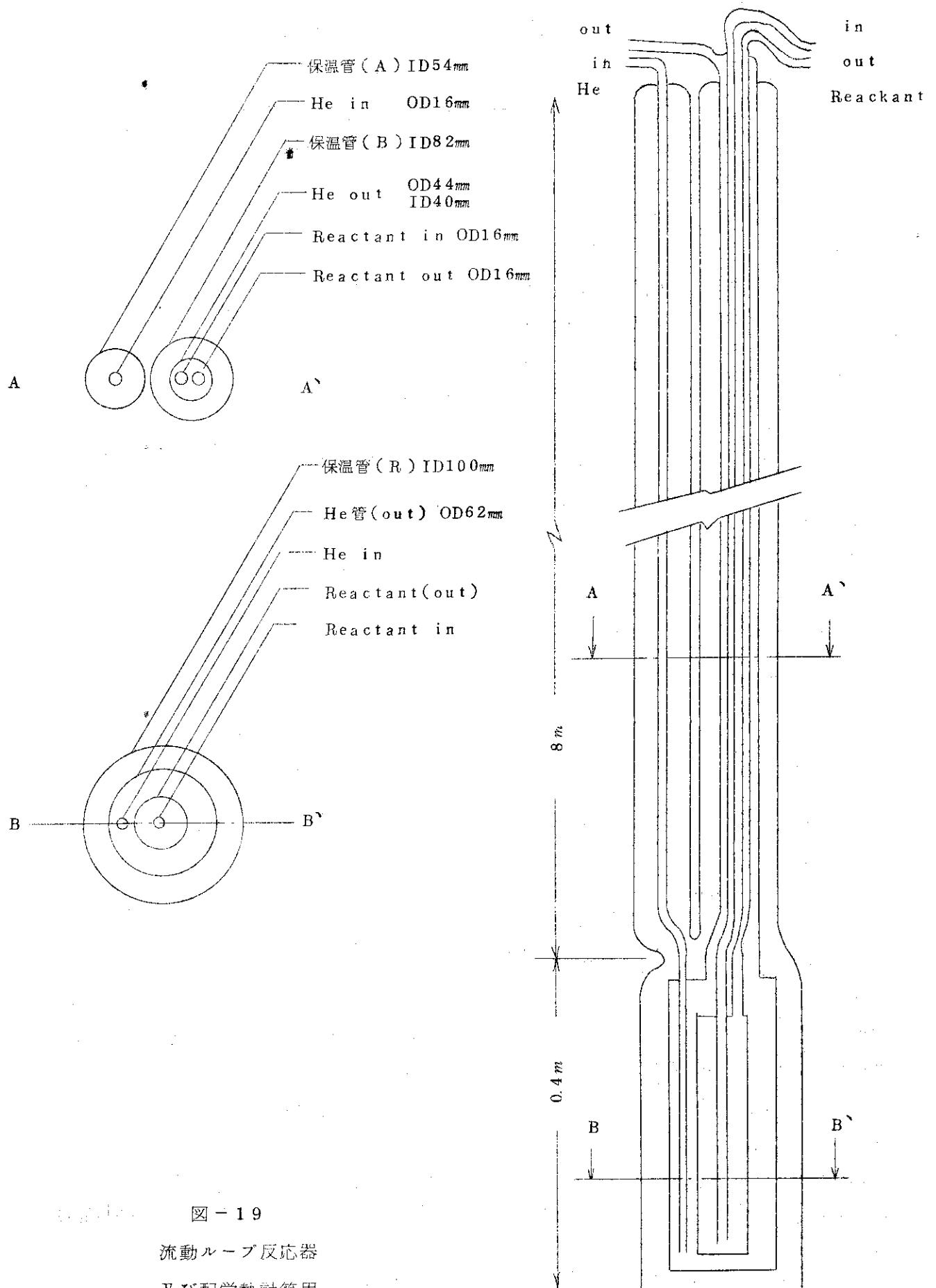


図-19

流動ループ反応器

及び配管熱計算用

概念図

ii) 热伝導度：保温層は石英ウールを充填する。保温ギャップは全部 19mm とした。内管は He で 400°C に、外管は水で 40°C に保たれているとする。熱伝導度は石英ウールの値がないのでガラス線維（太さ平均 4.7 μ, 密度 6.6~16.6 kg/m³, 化工便覧 p. 249）の 200 °C の値を平均としてとると約 0.05 kcal/m hr °C（このとき空気の熱伝導度約 0.0335, 化工便覧 p. 41）になる。

#### (iv) ヘリウム流量計算

ヘリウムの入口、出口の温度差  $\Delta t$  (°C) を 5°C とするためには、

$$\text{反応管部熱損失 } Q_L = -97 \text{ kcal/hr}$$

$$\text{反応管部発熱 } Q_R = +250 \text{ kcal/hr}$$

故に全熱損失  $Q = 150 \text{ kcal/hr}$  となる。

ヘリウム比熱 ( $4.97 \text{ kcal/kg mol}^{\circ}\text{C}$ )  $C_P = \frac{4.97}{4.003} = 1.241 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C}$  であるから、

$$\text{所要ヘリウム流量 } F_W = \frac{(150)}{(1.241)(5)} = 24.2 \text{ kg He/hr}$$

$$\text{or } " \quad F_V = \frac{(24.2)(22.4)}{(4.003)} = 135.3 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

#### (v) ヘリウム温度分布計算（反応器・配管）

保温管 (R) 出口温度を 400°C, 入口で 395°C とするための保温管 (A) 入口温度  $T_1$  と (B) 出口温度  $T_4$  を熱収支から評価する。 $Q_A, Q_B$  を保温管 A, B での熱損失として、

$$\begin{cases} F_W C_P (T_2 - T_1) = Q_A \\ F_W C_P (T_3 - T_4) = Q_B \end{cases} \quad (46)$$

とおくと、

$$F_W = 24.2 \text{ kg/hr}, \quad C_P = 1.241 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C}, \quad Q_A = 832,$$

$$Q_B = 1500 \text{ kcal/hr}, \quad T_2 = 395^{\circ}\text{C}, \quad T_3 = 400^{\circ}\text{C} \text{ 故に,}$$

$$\begin{cases} T_2 - T_1 = 27.7^{\circ}\text{C} \\ T_3 - T_4 = 5.0.0^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad \therefore \begin{cases} T_1 = 367.3^{\circ}\text{C} \\ T_4 = 350.0^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

#### (vi) 加熱器容量計算

加熱器は上の条件のとき、350°C のヘリウム（帰り）と熱交換して加熱されたヘリウム（行き）を更に 367.3°C に昇温するために必要である。ヘリウム熱交換器出口温度（= 加熱器入口温度）を、帰りのヘリウム温度の 60°C 下とすると、 $F_W = 24.2 \text{ kg/hr}$  のヘリウムを  $350 - 60 = 290^{\circ}\text{C}$  より  $367.3^{\circ}\text{C}$  に昇温するために要する熱量、 $Q_{H_1}$  は、

$$Q_{H_1} = (24.2)(367.3 - 290)(1.241) = 2320 \text{ kcal/hr} = 2700 \text{ watt}$$

となる。よって 3 kw の容量があればよい。

#### 熱交換器容量

図 20 の如く目標温度を定めると質量流量は行き帰りで同じ故、熱交換容量  $Q_E$  (kcal/hr) は、

$$\begin{aligned} Q_E &= F_W (T_1 - T_2) C_P = (24.2)(270)(1.241) \\ &= 8.11 \times 10^3 \text{ kcal/hr} \end{aligned}$$

熱交換器の規模については、 $h/C_p \sim 300$  (化工便覧 p. 165, 空気／ガス管内乱流伝熱, 管径  $D=1$  ~5 cm,  $Re \sim 10^4$ ) へリウム質量速度 ~10<sup>5</sup> (即ち  $(24.2 \text{ kg/hr}) / (2.4 \text{ cm}^2)$ ) の程度と考えれば、 $h/C_p = 300$ ,  $C_p = 1.24$  故,

$$h \sim 350 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$Q = UA \Delta T, \quad (47)$$

$$Q = Q_E = 8110 \text{ kcal/hr}$$

$$U = h = 350 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = (\Delta T)_{a.m.} = \frac{(350 - 290) + (80 - 30)}{2} = 55^\circ\text{C}$$

$$\therefore A = \frac{Q}{U \Delta T} = \frac{(8110)}{(350)(55)} = 0.422 \text{ m}^2$$

二重管型熱交で管径 ~2 cm, L = 1 m とすれば、1本当熱交換面積 ~0.06 m<sup>2</sup>。よって 8 本あれば充分である。但し、 $h$  が不充分な場合はフィン付管を用い内管に何等かの充填物を入れることも考える。

△水冷却器容量

熱交換器を出た帰りのヘリウムの冷却器の容量  $Q_C$  は、

$$Q_C = F_W (T_1 - T_2) C_p \\ = (24.2) (80 - 20) (1.24) = 1800 \text{ kcal/hr} \quad (48)$$

ただし、入口温度  $T_1 = 80^\circ\text{C}$ , 出口温度  $T_2 = 20^\circ\text{C}$  とした。冷却水量  $F_C (\ell/\text{hr})$  は入口  $15^\circ\text{C}$ , 出口  $35^\circ\text{C}$ , 比熱  $1 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$  として

$$F_C = (1800) / (20) = 90 \ell/\text{hr}$$

となる。

(b) ヘリウム系総括

反応器強制冷却用ヘリウム系統の概念図は図 21 の如くなる。

各機器の性能の目安をまとめると以下のようになる。(番号のないものは略算)

I) 循環ポンプ  $24.2 \text{ kg/hr}$ , 作動圧  $1 \sim 2 \text{ kg/cm}^2$  G

II) バッファータンク  $200 \ell$  程度のもの。整圧のため。

III) 热交換器 热交換容量  $8000 \text{ kcal/hr}$  程度。管径乱流伝熱,  $Re \sim 10^4$ , 伝熱管径 2 cm 程度として  $1 \text{ m} \times 8$  本を要する。

IV) 加熱器(1) 温度定常状態を得るための加熱器。容量 3 KW 程度。

加熱器(2) 高温反応起動時用ブースター加熱器。容量 6 KW 程度。

水冷却器(1) 高温反応後の系内冷却用。系の熱容量によるが ~500  $\ell/\text{hr}$  程度よい。

V) 保温管, 反応器 反応器内のヘリウム温度差を  $5^\circ\text{C}$  以内に納める。上下方向の伝

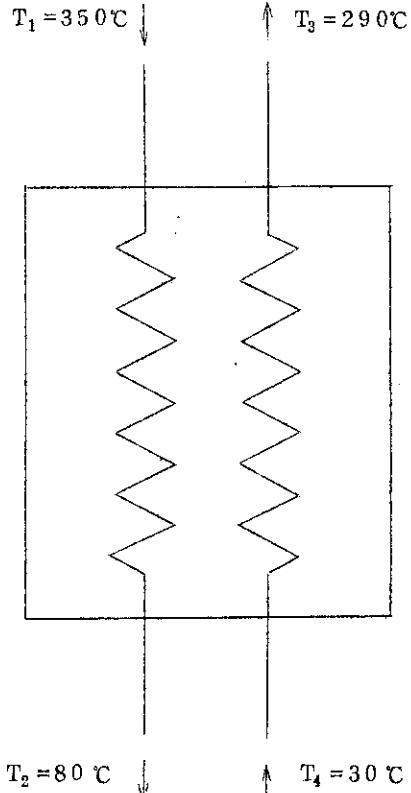


図-20 热交換器目標温度

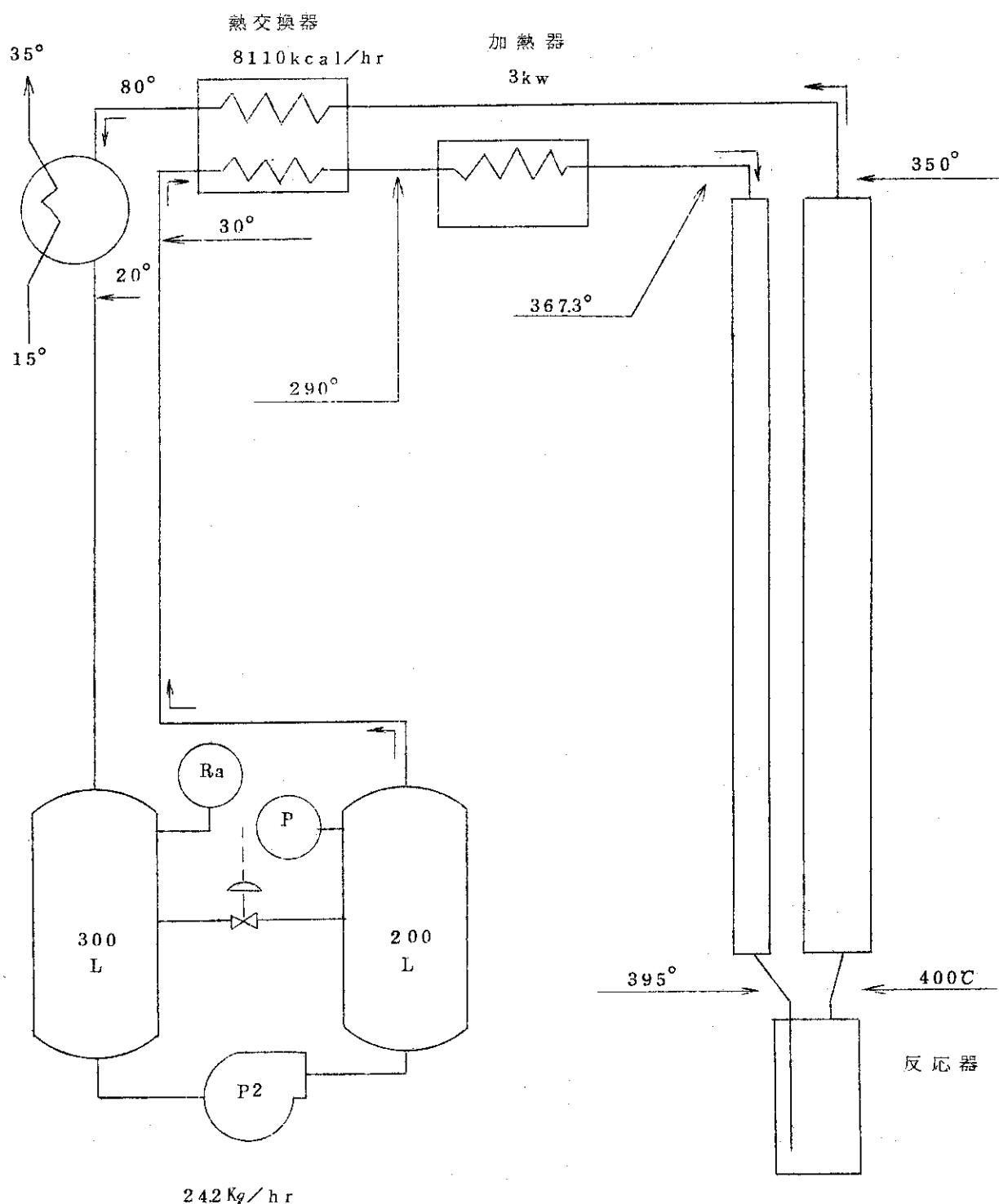


図-21

流动ループ

ヘリウム系概念図

熱フィンの使用が有効であろう。

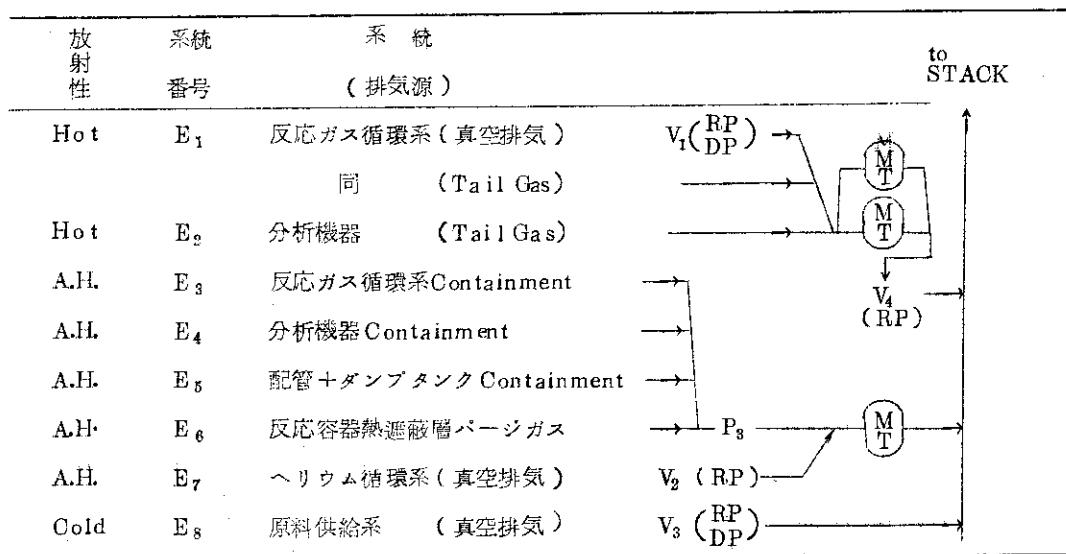
保温管は $\sim 100 \text{ kg/m}^3$ で石英ウールを充填する。保温層厚み $19\text{mm}$ 。

VI) 水冷却器(2)  $100 \text{ l/hr}$  程度の冷却水流量

VII) 吸入タンク  $300 \text{ l}$  程度のもの。整圧、圧調節のため。放射能モニター(NaIシンチレータ)を備える。

#### 4-2-3 排気系統

流動ループからの排気は次の8系統あり、原則としてホットな2系統( $E_1, E_2$ )と漏洩などの事故時ホットになり得る5系統( $E_3 \sim E_7$ )、ホットになることはない1系統( $E_8$ )に分かれ、又、8系統のうち3系統については真空排気系となる。詳細は図16、フローシートにあるが、概念的に系統を整理すると図22の排気系統図の如くなる。



A.H. 事故時放射性

RP 回転ポンプ

DP 拡散ポンプ

$P_3$  プロア(2HP程度)

放射性モニター付ダンプタンク

図-22 流動ループ排気系統図

#### ①排気ポンプ・プロア

$V_1$  : 反応ガス循環系 Containment 中におき、 $50 \text{ l/min}$  の回転ポンプと拡散ポンプで系内排気を行わせる。

$V_2$  : ヘリウム循環系の排気ポンプで、ヘリウム系容積を $1\text{m}^3$ 以下程度とすれば $300 \text{ l/min}$  程度の回転ポンプでよい。

$V_3$  : 原料供給系の排気ポンプで、 $400 \text{ l}$  程度の容積の高真空を得るため、 $200 \sim 300 \text{ l/min}$  の回転ポンプと拡散ポンプとする。

$V_4$  : モニター付ダンプタンク排気用で真空到達度は数 $\text{mmHg}$ 程度でよい。 $300 \text{ l/min}$  の回転ポンプとする。

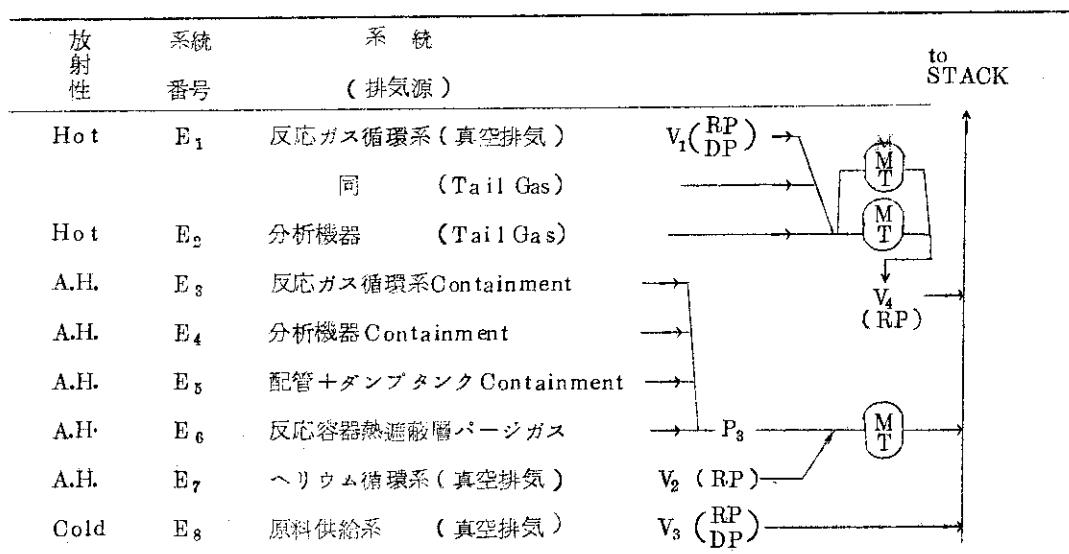
熱フィンの使用が有効であろう。

保温管は $\sim 100 \text{ kg/m}^3$ で石英ウールを充填する。保温層厚み19mm。

- vi) 水冷却器(2)  $100 \ell/\text{hr}$  程度の冷却水流量
- vii) 吸入タンク  $300 \ell$  程度のもの。整圧、圧調節のため。放射能モニター(NaIシンチレータ)を備える。

#### 4-2-3 排気系統

流動ループからの排気は次の8系統あり、原則としてホットな2系統( $E_1, E_2$ )と漏洩などの事故時ホットになり得る5系統( $E_3 \sim E_7$ )、ホットになることはない1系統( $E_8$ )に分かれ、又、8系統のうち3系統については真空排気系となる。詳細は図16、フローシートにあるが、概念的に系統を整理すると図22の排気系統図の如くなる。



A.H. 事故時放射性  
RP 回転ポンプ  
DP 拡散ポンプ  
 $P_3$  プロア(2HP程度)  
M  
T 放射性モニター付ダンプタンク

図-22 流動ループ排気系統図

#### ①排気ポンプ・プロア

$V_1$  : 反応ガス循環系 Containment 中におき、 $50 \ell/\text{min}$  の回転ポンプと拡散ポンプで系内排気を行わせる。

$V_2$  : ヘリウム循環系の排気ポンプで、ヘリウム系容積を $1\text{m}^3$ 以下程度とすれば $300 \ell/\text{min}$  程度の回転ポンプでよい。

$V_3$  : 原料供給系の排気ポンプで、 $400 \ell$  程度の容積の高真空を得るために、 $200 \sim 300 \ell/\text{min}$  の回転ポンプと拡散ポンプとする。

$V_4$  : モニター付ダンプタンク排気用で真空到達度は数mm程度でよい。 $300 \ell/\text{min}$  の回転ポンプとする。

P<sub>3</sub> : コンテインメント 3 系統などの減圧 (100 mbar 程度) のためのもの  
(a) ダンプタンク・遮蔽

常時放射性の 2 系統からは反応ガス排出ガスが出る。その量は最大 5 気圧  $10 \text{ l/min}$  として  $3000 \text{ l/hr}$  故、 $1 \text{ m}^3$  のダンプタンクは 20 分で満タンとなる。この時の排気放射能は  $U \approx 20 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ,  $\alpha = 1$ ,  $\phi_{th} = 1 \times 10^{13}$  とすると,  $I + Xe + Kr \approx 1 \mu\text{Ci/cm}^3$  故  $1 \text{ m}^3$  で約  $1 \text{ Ci}$  となる。したがってかなり（例えは  $\sim 10 \text{ cm}$  の Pb）の遮蔽が必要となる。

よって配管が細ければダンプタンク付近、太ければ循環系 Containment 付近に活性炭トラップ等（フローシートに入っていない）をおいて、まとめて遮蔽を考える必要があろう。

#### 4-2-4 分析機器

プロセスガスクロマトグラフ、分光光度計（紫外線又は赤外線）、波高分析器の 3 種類の分析機器を考える。対象とする成分は次の如くである。

- (a) プロセスガスクロマトグラフィー；炭化水素, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, アミン, ニトリル, 青酸, 他
- (b) 分光計；炭化水素, アミン, ニトリル, 青酸, 他
- (c) 波高分析器； I, Xe, Kr, 他

分析条件、機器の性能については、試料ガス hold up (放射能), 流量 (Time Response), 感度と精度を具体的に評価する必要がある。また放射性ガスの取扱い故、維持と操作上の便も考慮しなければならない。

## 5. 結 言

Fission chemistry 研究用流動ループの概念設計の基礎的段階として、反応器各部の発生熱量、温度分布、反応生成物収量、F.P.、ガス生成量などの基本的パラメータについて検討し、さらに JRR-4 に附設可能な流動ループの概念設計を行った。今後さらに検討すべき点としては、(i) 炉心の詳細な設計に基づく反応器内の中性子束およびガンマ線量率分布の精密な計算、(ii) 実際の分析操作や分析精度を考慮した上で実験条件の選定、(iii) F.P. ガスの除去、放射性ガスの密封およびページの方法など放射線安全に関する検討、(iv) その他の安全解析、事故解析に関する検討などがあげられる。

これらの検討が更に一層進められ、放射線化学プロセスの工業化のためのユニークな研究設備が実現され、この分野の進展に大きな寄与がなされることが期待される。

本研究は、序言に述べられた如く、放射線化学研究委員会化学用原子炉分科会の活動の成果を中心としてまとめられた。この委員会活動に御支援をいただいた、高崎研究所の本島健次

\* 図 13 より I+Xe+Kr の最大放射能は照射 1 時間後 ( $f(t) = 1.35$ )、直後では  $f(t) = 1.24$ 。 $\alpha = 1$ ,  $u = 20 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ,  $\phi_{th}$  を図の計算の  $1/2.5$  にとって  $\phi_{th} = 1 \times 10^{13}$  とすると、排気直後の排出ガス比放射能は  $(1.24)(2.36 \times 10^{-5})/(1)(20)(2.5) = 0.59 \times 10^{-6} \text{ Ci/cm}^3$ .

P<sub>3</sub> : コンテインメント 3 系統などの減圧 (100 atm Aq 程度) のためのもの  
(円) ダンプタンク・遮蔽

常時放射性の 2 系統からは反応ガス排出ガスが出る。その量は最大 5 気圧  $10 \ell/\text{min}$  として  $3000 \ell/\text{hr}$  故、 $1\text{m}^3$  のダンプタンクは 20 分で満タンとなる。この時の排気放射能は  $U \approx 20 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ,  $\alpha = 1$ ,  $\phi_{th} = 1 \times 10^{18}$  とすると、 $I + Xe + Kr \approx 1 \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$  故  $1\text{m}^3$  で約  $1\text{Ci}$  となる。したがってかなり（例えば  $\sim 10\text{cm}$  の Pb）の遮蔽が必要となる。

よって配管が細ければダンプタンク付近、太ければ循環系 Containment 付近に活性炭トラップ等（フローシートに入っていない）をおいて、まとめて遮蔽を考える必要があろう。

#### 4-2-4 分析機器

プロセスガスクロマトグラフ、分光光度計（紫外線又は赤外線）、波高分析器の 3 種類の分析機器を考える。対象とする成分は次の如くである。

(i) プロセスガスクロマトグラフィー；炭化水素、N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、アミン、ニトリル、青酸、他

(ii) 分光計；炭化水素、アミン、ニトリル、青酸、他

(iii) 波高分析器；I、Xe、Kr、他

分析条件、機器の性能については、試料ガス hold up (放射能)、流量 (Time Response)、感度と精度を具体的に評価する必要がある。また放射性ガスの取扱い故、維持と操作上の便も考慮しなければならない。

## 5. 結 言

Fission chemistry 研究用流動ループの概念設計の基礎的段階として、反応器各部の発生熱量、温度分布、反応生成物収量、F.P.、ガス生成量などの基本的パラメータについて検討し、さらに JRR-4 に附設可能な流動ループの概念設計を行った。今後さらに検討すべき点としては、(i) 廉心の詳細な設計に基づく反応器内の中性子束およびガンマ線量率分布の精密な計算、(ii) 実際の分析操作や分析精度を考慮した上で実験条件の選定、(iii) F.P. ガスの除去、放射性ガスの密封およびバージの方法など放射線安全に関する検討、(iv) その他の安全解析、事故解析に関する検討などがあげられる。

これらの検討が更に一層進められ、放射線化学プロセスの工業化のためのユニークな研究設備が実現され、この分野の進展に大きな寄与がなされることが期待される。

本研究は、序言に述べられた如く、放射線化学研究委員会化学用原子炉分科会の活動の成果を中心としてまとめられた。この委員会活動に御支援をいただいた、高崎研究所の本島健次

\* 図 13 より I+Xe+Kr の最大放射能は照射 1 時間後で ( $f(t) = 1.35$ )、直後では  $f(t) = 1.24$ 。 $\alpha = 1$ ,  $u = 20 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ,  $\phi_{th}$  を図の計算の  $1/2.5$  にとって  $\phi_{th} = 1 \times 10^{18}$  とすると、排気直後の排出ガス比放射能は  $(1.24)(2.36 \times 10^{-6})/(1)(20)(2.5) = 0.59 \times 10^{-6} \text{ Ci/cm}^3$ .

所長，沢柳正一前所長その他の方々，及び研究炉管理部JRR-4管理課の伊勢幸正課長をはじめとするJRR-4改造計画グループの方々に感謝致します。また，本稿の図面作成に努力していただいた高崎研研究部（東海）の小林敏明氏，原稿浄書をお願いした古川恵子さんにも感謝致します。

Fissionchemistry の研究は，米国で最初にとりあげられ，AGN (Aerojet General Nucleonics) と BNL (Brookhaven National Laboratory) のグループが大きな成果を挙げた。その刺激を評価して，以下に代表的成果を付録として述べた。

## 付録1 : AGN流動ループ実験概要 \*1

FissiochemicalなN<sub>2</sub>の固定

## (1)反応器と燃料

AGN では図1-1に典型的に示すような Plate型の反応器と図1-2の Fiber型の反応器を使用して N<sub>2</sub>の固定(生成物 HCN)を行ったが Fiber型では燃料が収縮を起し燃料劣化によって再現性が悪かった。それ故一連の実験は Plate型反応器によって行われた。

## (2)温度とG値の関係

図1-3に示すように温度とともにあきらかに G値は増大する。

## (3)温度と線量の効果

図1-4に示すように G値は流量の増加(線量の減少)とともに上昇する。この効果は生成物 HCN が照射によって破壊されることに起因すると考えられる。

## 付録2 : BNL実験計画概要 \*2

## 1. Brookhaven Chemonuclear In-Pile Research Loop (B-CIRL) の目的と展望

BNL では次の如き目標を掲げてループを建設し、1967年から1969年にかけて、実験が行われた。

(a) 気相流通法による中性子、ガンマ線、核分裂片による化学反応の研究。生成物質の決定、生成率、圧力、温度、速度、放射線強度の関連性。

(b) 固体燃料の放射線エネルギー吸収効果の研究。燃料の放射線、機械的、化学的、熱的安定性の実測。

(c) 生成系の核分裂生成物による汚染度の測定と除染手段の有効性の研究。

とりあげられる反応系としては、次の6つの化学反応系が考慮され、(2), (3)の系についての実験が行われた。

- (1) N<sub>2</sub>O → N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> (線量測定)
- (2) O<sub>2</sub> → O<sub>3</sub>
- (3) N<sub>2</sub> + O<sub>3</sub> → NO<sub>2</sub>
- (4) CO<sub>2</sub> → CO + O<sub>2</sub>
- (5) CH<sub>4</sub> → C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> など
- (6) NH<sub>3</sub> → N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>

\*1) J. H. Cusack and P. A. King, AGN-8196 "Fissiochemical Development Program, Final Report". Vol. 1, 2. August, 1966. このレポートはAGNとUnion Carbide のグループの行った大量の研究の最終報告である。この付録はN<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub>系に直接関係したループ実験報告部分のまとめである。

\*2) M. Steinberg, W. Tucker, C. Waide, M. Beller, P. Bezler and B. Manowitz, BNL-13001 "Safety Review of the Brookhaven Chemonuclear In-pile Research Loop". October 1968.

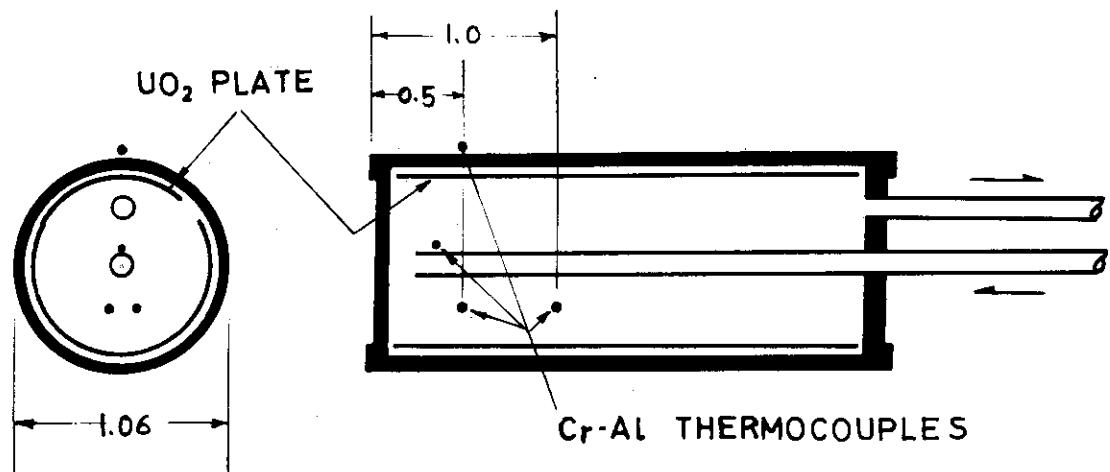


図1-1 Plate型反応器の一例（寸法インチ）

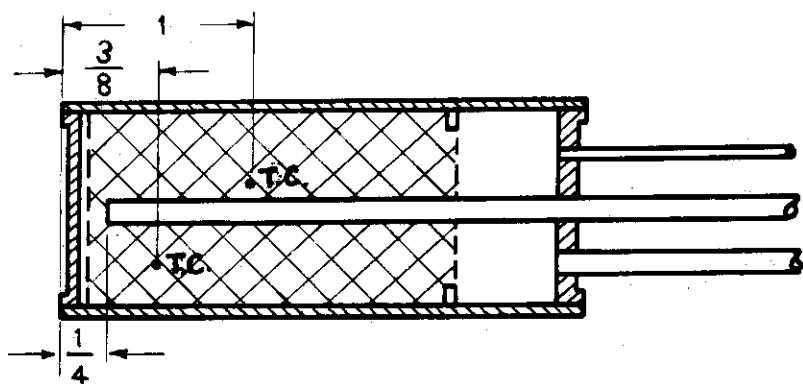


図1-2 Fiber型反応器の一例（寸法インチ）

T. C. は温度測定位置（熱電対）

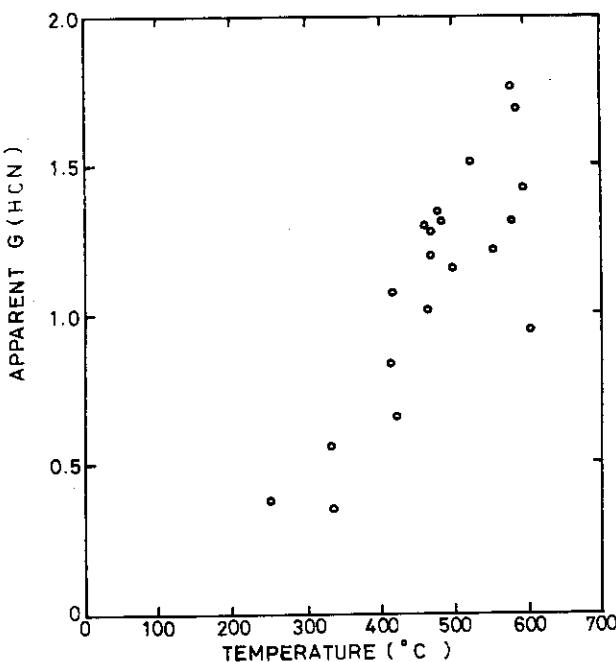


図 1-3 溫 度 と G 値 の 関 係

5.6 %  $\text{CH}_4$  + 94.4 %  $\text{N}_2$ , 395 psig, 滞留時間  
3 ~ 6 sec, 線量約  $1 \times 10^{21} \text{ eV/g}$ , 線量率, 約  $2 \times 10^{20} \text{ eV/g sec}$ , plate型反応器による実験

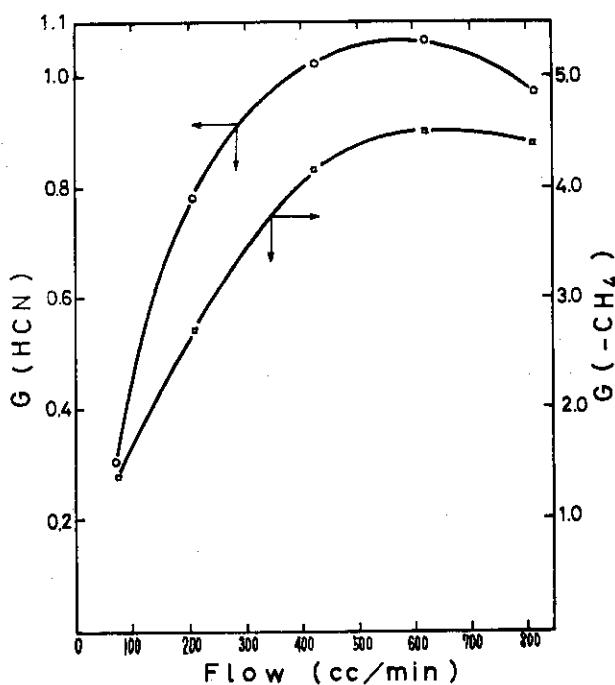


図 1-4 流 量 と G 値 の 関 係

plate型反応器, 1.05 %  $\text{CH}_4$  +  $\text{N}_2$ ,  
204 psig, 325 ~ 350 °C

## 2. 一般的特性

B-CIRL の特性を述べると次の如くである。反応物質（気体）の最高温度、圧力、流速はそれぞれ 1000 psig, 1000°F (538°C), 100 ft/sec であるような反応管（三重）が、原子炉 (BGR, 20MW 黒鉛炉) 中を貫通する 4 in. 角の実験孔に入れられる。反応管の内側からガスが流出し、二番目のギャップをガスが流入し、その外側が断熱材と真空により熱遮蔽となり、三重管の外側を空気が流れる（炉の冷却ガス）ような構造となっている。核燃料は honey comb 型の U-Pd はくを用い、炉運転中に出し入れも可能な構造である。反応ガスは予熱器または冷却器で 427°C と -30°C の間の任意の温度に調節され、反応管を出てからは、冷却器により 93°C まで冷却される。分析はループの 3ヶ所から  $750 \text{ cm}^3/\text{min}$ , 10 psig で採取されたガスについて行われる。分析機器としては、質量分析計、ガスクロマトグラフ、光電分光計、水分計、400 チャンネル波高分析器をもつシンチレーションカウンターが組み込まれている。

## 3. 運転、研究計画

予備試験後、次の順序で運転が計画された。

- (1) 照射前試験
- (2) 無燃料実験。①  $\text{O}_2-\text{O}_3$  系、② 線量測定、③  $\text{N}_2+\text{O}_2$  系、④  $\text{O}_2-\text{O}_3$  系（再実験）
- (3) 燃料使用実験。①  $\frac{1}{8}$  in 孔径の honeycomb 型燃料 1 ft 長 ( $\approx 1.3 \text{ g } ^{235}\text{U}$ ) を用いた実験、② 同じ燃料を 5 ft 長用いた実験、③ 0.040 in 孔径の honeycomb 型燃料 1 ft 長 ( $\approx 4.2 \text{ g } ^{235}\text{U}$ ) を用いた実験

## 4. 運転特性

ループ運転の際、反応ガスを循環して分析などに必要な生成物濃度を得るために累積時間 build-up time,  $t$  を計算すると、

- (1) 全ループ体積 =  $8.12 \text{ ft}^3$
- (2) 有効炉内体積（核燃料無し） =  $0.60 \text{ ft}^3$
- (3) 熱中性子束 =  $0.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$  (20MW, 無燃料)  
 $= 1.5 \times 10^{12} \text{ " " ( " " 燃料有 )}$
- (4) 炉内の中性子とガンマ線による線量率  
 $= 6.25 \text{ Mrad/hr (N}_2\text{なし)}$   
 $= 7.5 \text{ Mrad/hr (N}_2\text{Oの場合)}$

として、60°F, 1気圧で

- (a) 無燃料、炉内バックグラウンド放射線のみの場合、

$$t_p = 7.52 \text{ CW}_T / \text{GILPM}^2$$

- (b) 核燃料のみで考えるとき、

$$t_f = 0.975 \text{ CW}_T / W_F \text{ GE}_0 M$$

このとき核分裂出力  $P_f$  は、 $P_f = 4.5 \times 10^{-11} \phi W_F$  となる。

(c) 核燃料があるとき全体としての  $t$  は

$$t = t_p t_f / (t_p + t_f)$$

但し,  $t$  : 累積時間 [min]

$L$  : 廉内有効体積 = 0.60 ft<sup>3</sup>

$I$  : 廉内放射線強度 [Mrad/hr]

$W_T$  : ループ内のガス全重量 [lb]

$M$  : 反応物質分子量

$T$  : ループの温度 [°K]

$C$  : 必要濃度(体積) [ppm]

$W_F$  : 全  $^{235}\text{U}$  重量 [g]

$G$  : 反応 G 値

$P$  : 圧力 [atm]

$E_0$  : 核分裂片エネルギー吸収効率

$\phi$  : 热中性子束 [ $n/cm^2 \text{ sec}$ ]

## 5. 設 計

主な素材は 316 ステンレス鋼である。廉内部分は、内側から、 $2\frac{1}{4}$  in. o.d. 0.065 in. wall (反応ガス行き),  $2\frac{1}{2}$  in. Sch 40 (反応ガス帰り), 3 in. Sch 10 (断熱・真空層) の三重管が、4 in. 角の実験孔に入っている。廉外部分は、耐熱性フィルター, 25 kw × 6 素子の電熱予熱器, 5 kw 冷凍機, ガスペアリングの循環ポンプなどからなり, 4つの Containment に, 排気系以外の全部分が納められている。燃料は,  $\text{N}_2 + \text{O}_2$  系での耐食性を得るため  $0.2\mu$  の白金被覆層をつけた,  $2.1\mu$  の U-Pd 合金または,  $2.5\mu$  の合金であり, すべて, honeycomb 型直径 1.5 in. 2 in. 長のユニットにまとめたものを用いる。この honeycomb は反応ガス圧力に応じて, 孔径 6, 3, 1 mm のものが用意された。