

JAERI - M  
89-073

ベリリウム中のトリチウム挙動実験(1)

— 中性子照射キャプセルの製作 —

1989年6月

河村 弘・石塚 悦男・松本実喜夫・稲田 征二  
加藤 岑生・瀬崎 勝二・斉藤 実

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 株式会社原子力資料サービス

ベリリウム中のトリチウム挙動実験(1)  
—中性子照射キャプセルの製作—

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

河村 弘・石塚 悦男・松本実喜夫  
稲田 征二・加藤 岑生<sup>+</sup>・瀬崎 勝二  
斉藤 実

(1989年5月18日受理)

JMTRでは、一次冷却水中のトリチウム濃度が原子炉運転に伴って増加する現象が観察されており、このトリチウムの発生源の1つとして炉心構成要素の中で最もトリチウムを多く含んでいるベリリウム製反射体要素が注目されている。また、核融合炉ブランケット技術開発の一環として、トリチウム増殖ブランケット材(即ちトリチウム増殖材と中性子増倍材)の照射試験が計画されており、中性子増倍材としてベリリウムが照射されようとしている。そこで、我々は、ベリリウム中のトリチウム挙動を正確に把握するために、反射体要素材の製造法であり、中性子増倍材の製造法と思われるホットプレス法により製造したベリリウムを照射試料とし、その照射試料をキャプセルに入れて JMTR で中性子照射を行なった。

本報告書では、中性子照射キャプセルの製作の観点から、照射試料の仕様とキャプセル形状についてまとめるとともに、キャプセルを解体する上で把握しておく必要がある試料容器内のトリチウム量評価のために照射後に行なった試料容器のパンクチャー試験結果について述べる。

Experiments on Tritium Behavior in Beryllium (1)  
- Fabrication of Capsules for Neutron Irradiation -

Hiroshi KAWAMURA, Etsuo ISHIZUKA, Mikio MATSUMOTO  
Seiji INADA, Mineo KATO<sup>+</sup>, Katsuji SEZAKI  
and Minoru SAITO

Department of JMTR Project  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received May 18, 1989)

In JMTR, it was observed that the tritium concentration of the primary coolant increases with the reactor operation at 50 MW. As one of the tritium generation sources, we paid attention to a neutron reflector made of beryllium because the tritium generation rate in the beryllium is bigger than other components in the reactor core. On the other hand, the irradiation test of blanket materials (i.e. tritium breeding materials and neutron multiplying materials) are planned for development of the fusion reactor in JMTR and the beryllium will be also irradiated as a neutron multiplier with tritium breeding materials. Therefore, as the irradiated specimens, we used a hot-pressed beryllium disk fabricated by the same method as the neutron reflector or the neutron multiplier and conducted the irradiation tests in JMTR. The purpose of these tests are to clarify the tritium behavior in the hot-pressed beryllium.

In this paper, from a viewpoint of the fabrication of capsules for neutron irradiation, the specifications of the irradiated specimens and

---

+ Department of Radioisotopes, Tokai Research Establishment

capsules are summarized. Additionally, the results on the puncture test of the container of the irradiation specimens are described.

Keywords: Hot-Pressed Beryllium, Neutron Irradiation, Tritium Behavior, JMTR, Capsule, Irradiation Condition

## 目 次

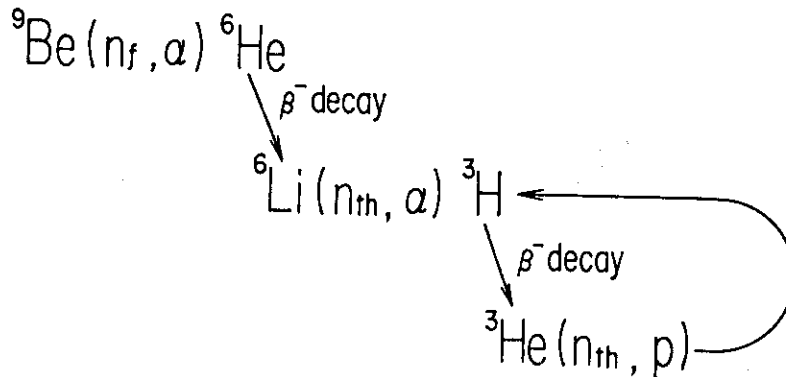
1. 序 論 .....	1
2. 中性子照射仕様 .....	2
2.1 照射試料 .....	2
2.2 照射キャプセル .....	3
3. 照射試料の照射時温度計算結果 .....	19
4. 試料容器のパンクチャー試験結果 .....	22
5. 結 論 .....	24
6. あとがき .....	24
謝 辞 .....	24
参考文献 .....	25
付録A ベリリウム原子力分野への利用 .....	26

Contents

1. Introduction .....	1
2. Specifications of Neutron Irradiation .....	2
2.1 Irradiation Specimens .....	2
2.2 Irradiation Capsules .....	3
3. Calculated results for Evaluating Temperature of Beryllium Specimens .....	19
4. Results of Puncture Test of Container containing Beryllium Specimens .....	22
5. Conclusion .....	24
6. Concluding Remarks .....	24
Acknowledgements .....	24
References .....	25
Appendix Applications of Beryllium for Fields of Atomic Energy ....	26

## 1. 序 論

ベリリウムは密度が小さく、機械的、熱的及び化学的特性に優れているため<sup>1),2)</sup>、各種産業分野で利用されている。特に、原子力分野においては、試験研究炉で反射体要素材として用いられ<sup>3)</sup>、また、核融合炉で中性子増倍材、リミッター材等としての使用が考えられている<sup>4)-11)</sup>。ベリリウムを原子力分野で用いる場合、中性子照射によりベリリウム中にトリチウムが生成する。ベリリウム中のトリチウム生成核反応を以下に示す。



従って、ベリリウム中のトリチウム挙動（拡散特性、固溶特性等）を正確に把握することが原子力分野での利用のために重要となるが、ベリリウム中のトリチウム挙動はわずかしか研究されていない<sup>12)-16)</sup>。

一方、材料試験炉（Japan Materials Testing Reactor: JMTR）でも、ベリリウムは反射体要素材として直接原子炉一次冷却水にふれながら使用されている。現在、JMTRでは、一次冷却水中のトリチウム濃度が原子炉運転時に増加する現象が観察されており、ベリリウムが、このトリチウムの発生源の1つとして着目されている。そこで、我々はトリチウム発生源と放出機構を明らかにするため、反射体要素材と同一の手法により製作したディスク形状のホットプレスベリリウム試験片を照射試料とし、これらの試料を用いて照射後にベリリウム中のトリチウム挙動を調べることにした。照射試料は、照射中にベリリウムから放出される反跳トリチウム量を評価するために約100 μm厚さのアルミニウム箔で包まれ、Heガスを試料容器内に充填して密封し、JMTRで照射された。

本報告書では、中性子照射キャプセル製作の観点から、照射試料の仕様とキャプセル形状についてまとめるとともに、キャプセルを解体する上で把握しておく必要がある試料容器内のトリチウム量評価のために照射後に行なった試料容器のパンクチャー試験結果について述べる。

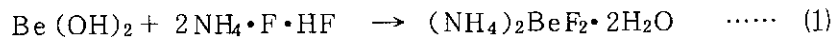


## 2. 中性子照射仕様

### 2.1 照射試料

本照射試料は、日本碍子（株）製の原子炉級ホットプレスベリリウムであり、JMTRの反射体要素材と同質のものである。本試料は、インナーキャプセル名がA、B及びCと称されるものの中に入れて照射した（照射仕様の詳細については3章で述べる）。本照射試験には製造時期の異なる2種類のベリリウム試料を用いた。AとBには製造時期が同じ試料を入れ、Cには別の時期に製造した試料を入れた。前者及び後者の化学成分表を各々Table 1及びTable 2に示す。両者はほとんど同じである。主な不純物はBeOであり、Beは約99%の純度である。BeとBeOの成分を加算すると100%を越えるのは分析精度が悪いためである。尚、Beはアルミノン吸光度法、BeOはブロムメタノール法で分析した。

本試料は金属ベリリウムをホットプレスすることにより製造したものである。まず、金属ベリリウムの製造方法について述べ、次にそれ以降の製造プロセスについて述べる。金属ベリリウムは、硫酸法により鉱石中からカ性ソーダで水酸化ベリリウムの形で分離される。その水酸化ベリリウムを酸性フッ化アンモニウム溶液に溶解してフッ化ベリリウムアンモニウム溶液とし(1)式、蒸発させて高純度のフッ化ベリリウムアンモニウムが作られる。それから、そのフッ化ベリリウムアンモニウムを熱分解してフッ化ベリリウムが作られ(2)式、そのフッ化ベリリウムが約1300°Cで金属マグネシウムで還元されて金属ベリリウムとなる(3)式。主な化学反応を(1)式から(3)式に示す。



金属ベリリウムからの製造プロセスをFig. 1に示す。ベリリウムのホットプレス条件及びベリリウム薄板製作のための熱間圧延条件をTable 3に示す。尚、熱間圧延は長方体のベリリウムホットプレスブロック（1次板）を真ん中に入れ、そのブロックの六面を軟鋼板（SS41）で囲み、板の境目をTIG溶接した後に実施した。熱間圧延前後の形状をFig. 2に示す。板厚が1.8mmになるまで圧延し、圧延時のベリリウム被覆材であるSS41及びベリリウム表面酸化膜の削除を兼ねてこれをベルト研磨で1.4mmにし、このベリリウム板から所定の寸法に旋盤加工し、照射試験用試料とした。

完成した照射試験用試料の概略形状は $\phi 10\text{mm} \times {}^t 1.4\text{mm}$ である。インナーキャプセルA及びBに入れた試料の詳細形状と重量をTable 4に、インナーキャプセルCに入れた試料のそれらをTable 5に示す。また、それら全ての試料は、ベリリウムからの反跳放出トリチウムを捕らえることにより反跳放出率を求めるためにアルミニウムフォイルで包まれている。尚、このアルミニウムフォイルは昭和アルミニウム（株）製で、厚さは約100 $\mu\text{m}$ であり、99.99%の純度のものである。化学成分表をTable 6に示す。

## 2.2 照射キャプセル

2.1節で述べたベリリウム試料の中性子照射はJMTRを用いて行なった。照射キャプセルは、試料容器、インナーキャプセル及び外容器から構成される。具体的には、5個或は8個のベリリウム試料を1個の試料容器に入れ、その試料容器を1個のインナーキャプセルに入れ、そのインナーキャプセルをさらに1個の外容器に入れることになる。従って、ベリリウム試料から見ると3重構造になっている。試料容器及びインナーキャプセルは高純度Heガス(99.999%)が充填された密封容器であり、外容器は非密封容器であるため、インナーキャプセルの外側及び外容器の内外両側は原子炉一次冷却水で冷やされる。本ベリリウム試料照射には、3本のキャプセルが用いられた。それらのキャプセル名は各々Cap-1、Cap-2及びCap-3である。Cap-1及びCap-2には各々1個ずつのインナーキャプセルが装荷されており、各々に5個ずつのベリリウム試料(A1箔で包まれたもの)が入れられている。また、Cap-3には、2個のインナーキャプセルが装荷されており、各々に8個ずつのベリリウム試料(A1箔で包まれたもの)が入れられている。各キャプセルの照射領域は、Cap-1及びCap-3は燃料領域、Cap-2は反射体領域である。燃料領域と反射体領域との照射特性の大きな相違は、高速中性子束/熱中性子束比が前者では約1であるのに対して、後者では約0.1であることである。JMTRの炉心図をFig. 3に示す。これまでに述べたことも含めて、これらキャプセルの名前、インナーキャプセルの名前及び数、照射孔、照射サイクルNo.、ベリリウム試料の数、熱中性子照射量及び高速中性子照射量等についてTable 7にまとめて記す。また、キャプセルCap-1に入れられているインナーキャプセルの概観及びキャプセル内のインナーキャプセルの位置を各々Fig. 4及びFig. 5に、同様にCap-2について各々Fig. 6及びFig. 7に、Cap-3について各々Fig. 8及びFig. 9に示す。

Table 1 Results of chemical analysis of beryllium specimen irradiated in inner-capsule A and B

Chemical Component	Analysis Value (%)
Be	98.76
BeO	1.60
Al	0.0050
B	0.0002
Cd	0.0001
Ca	0.016
C	0.072
Cr	0.0095
Co	<0.0005
Cu	<0.0005
Fe	0.062
Pb	<0.0003
Li	<0.0001
Mg	0.0030
Mn	0.0100
Ni	0.0090
Mo	<0.0001
Si	<0.0100
Ag	<0.0002
Cl	<0.0060
N	0.0120

Table 2 Results of chemical analysis of beryllium specimen irradiated in inner-capsule C

Chemical Component	Analysis Value (%)
Be	99.28
BeO	1.28
Al	0.0320
B	0.00009
Cd	0.0002
Ca	0.0031
C	0.0950
Cr	0.011
Co	0.0007
Cu	0.0021
Fe	0.0610
Pb	0.0020
Li	0.0003
Mg	0.0090
Mn	0.0100
Ni	0.020
Mo	0.0019
Si	0.0236
Ag	0.0004
Cl	0.0030
N	0.0380

Table 3 Conditions of Hot-Rolling

## (a) Hot-Pressing Process

Temperature (°C)	1050~1100
Degree of Vacuum (torr)	$1 \times 10^{-5}$
Pressing Period (h)	5 ~ 6

## (b) Hot-Rolling Process

Temperature (°C)	900
Preheating Period (min)	30
Rolling Period (min)	60

Table 4 Detailed dimension and weight of beryllium specimen irradiated in inner-capsule A and B

Sample Number	Weight (g)	Dimension (mm)		Capsule Name
		Diameter	Thickness	
1	0.21298	10.0	1.4	A
2	0.21269	10.0	1.4	
3	0.20894	10.0	1.4	
4	0.20685	10.0	1.4	
5	0.20683	10.0	1.4	
6	0.20654	10.04	1.4241	B
7	0.20718	10.05	1.4141	
8	0.21085	10.05	1.4545	
9	0.20550	10.05	1.4140	
10	0.21268	10.05	1.4646	

Table 5 Detailed dimension and weight of beryllium specimen irradiated in inner-capsule C

Sample Number	Weight (g)	Dimension (mm)		Capsule Name
		Diameter	Thickness	
1	0.20352	10.0	1.415	C - 1
2	0.20895	10.0	1.444	
3	0.20540	10.1	1.415	
4	0.21272	10.1	1.463	
5	0.20780	10.1	1.449	
6	0.20638	10.1	1.428	
7	0.20659	10.1	1.431	
8	0.20472	10.1	1.426	
9	0.20801	10.1	1.443	C - 2
10	0.20592	10.1	1.426	
11	0.20914	10.1	1.458	
12	0.20568	10.1	1.428	
13	0.20213	10.1	1.405	
14	0.20689	10.1	1.442	
15	0.20893	10.0	1.454	
16	0.20534	10.0	1.422	

Table 6 Results of chemical analysis of pure aluminium foil for wrapping beryllium specimen

Chemical Component	Analysis Value (%)
Al	99.993
Fe	0.001
Si	0.001
Cu	0.005

Table 7 Irradiation conditions of beryllium

Capsule Name	Cap - 1	Cap - 2	Cap - 3	
Irradiation Hole <sup>1)</sup>	H-7-2	G-5	H-9-2	
Irradiation Cycle No.	75	73~75	77	
Numbers of Inner Capsule	1	1	2	
Inner Capsule Name	A	B	C-1	C-2
Numbers of Beryllium	5	5	8	8
Thermal Neutron Fluence <sup>2)</sup>	4.6 <sup>3)</sup>	13.4 <sup>3)</sup>	5.1 <sup>3)</sup>	
Fast Neutron Fluence <sup>2)</sup>	4.74 <sup>4)</sup> ( 3.2 <sup>3)</sup> )	2.4 <sup>3)</sup>	3.3 <sup>3)</sup>	
( Remarks )	85M-12J	85M-31J	85M-15J	

1) See Fig. 3

2) Dimension :  $\times 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup>

3) Calculated values

4) Measured value



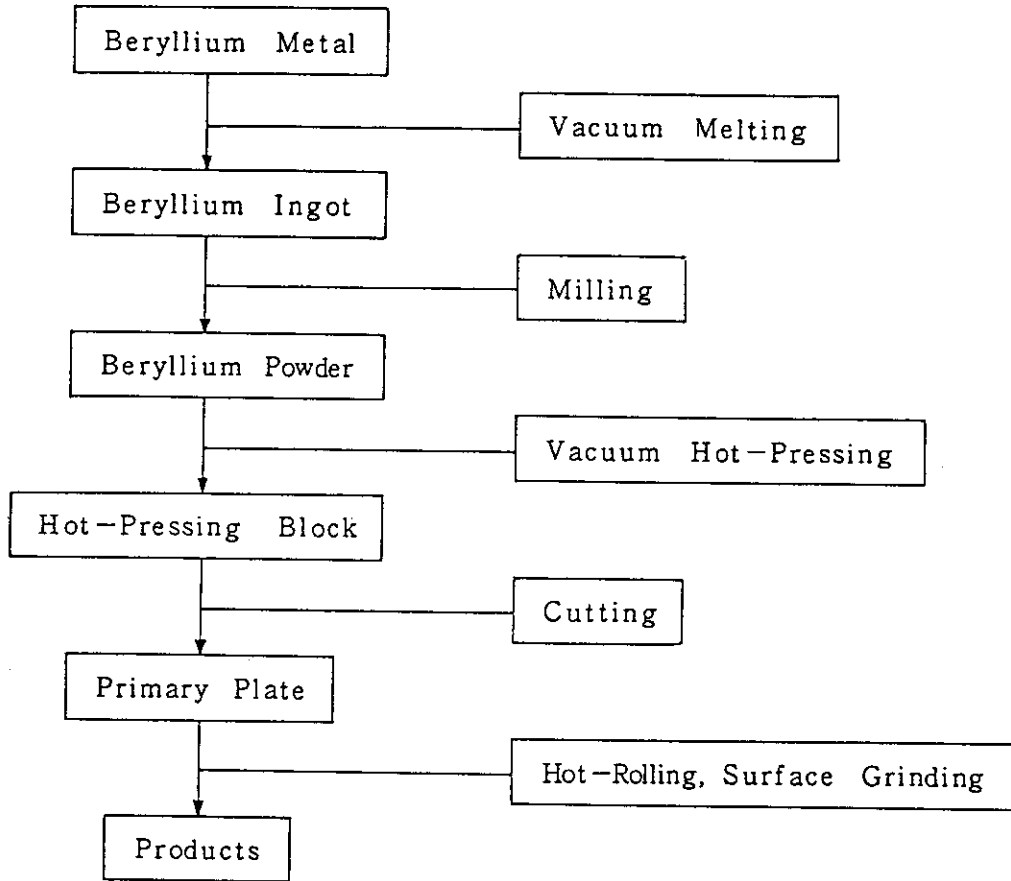


Fig. 1 Fabrication process from beryllium metal to Hot-Pressed beryllium

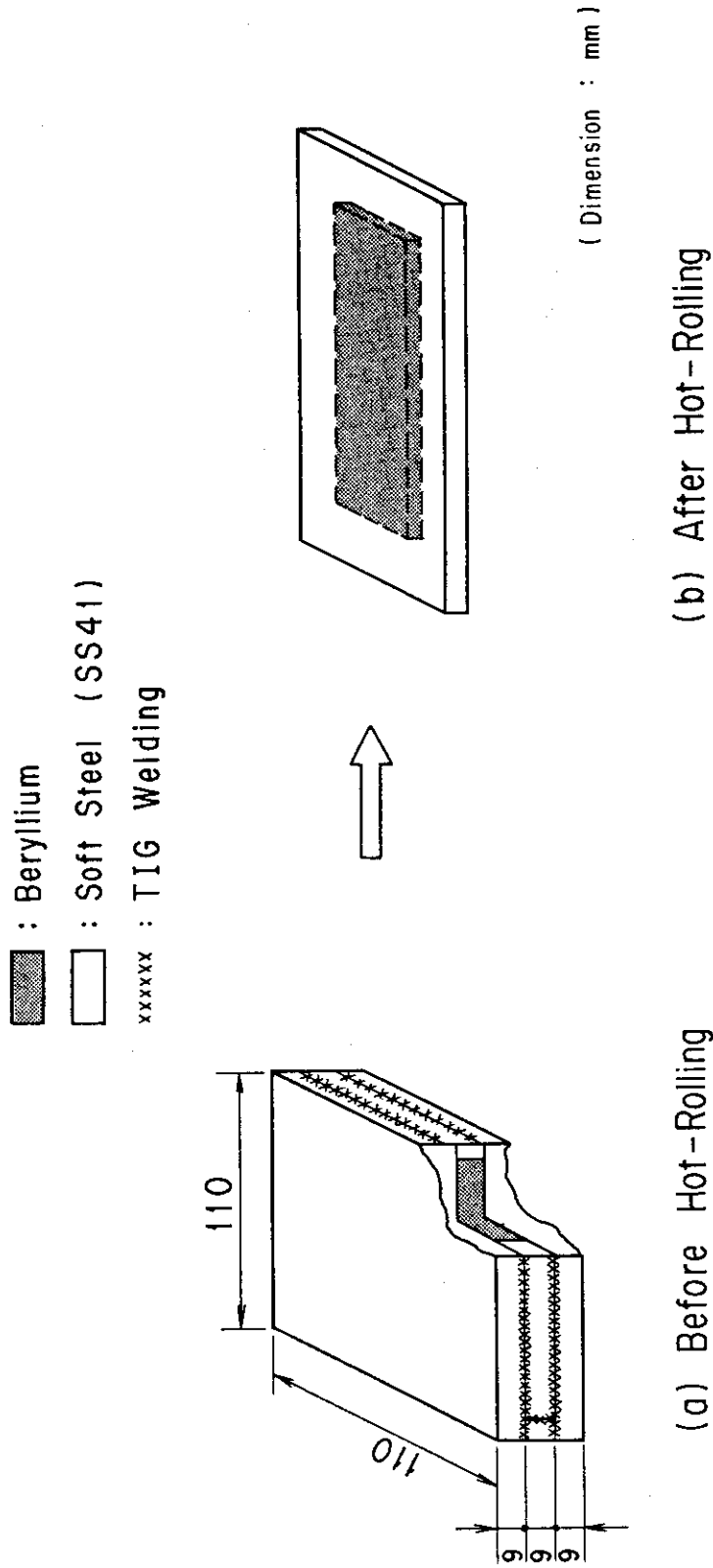


Fig. 2 General views before and after Hot-Rolling of beryllium

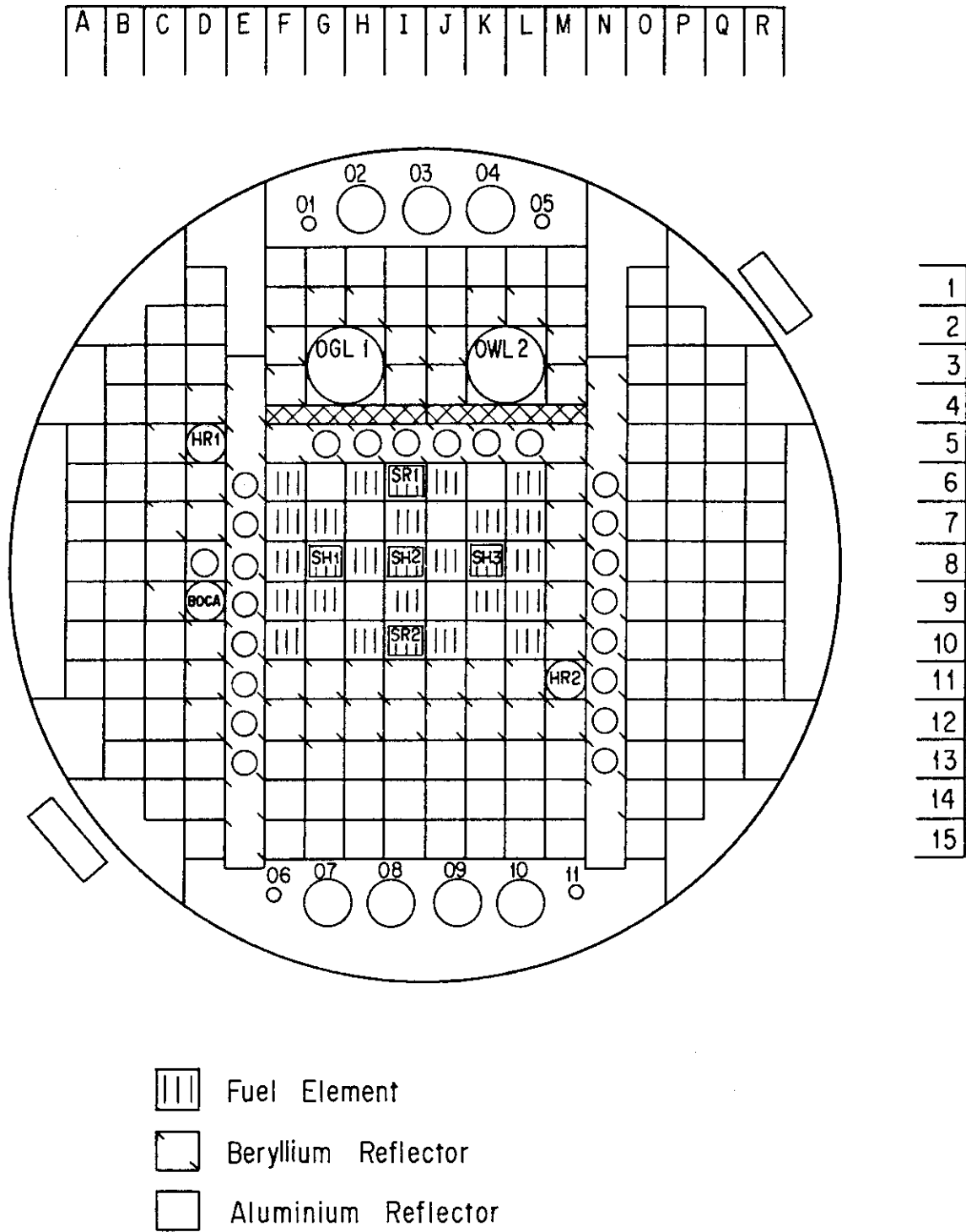


Fig. 3 JMTR core

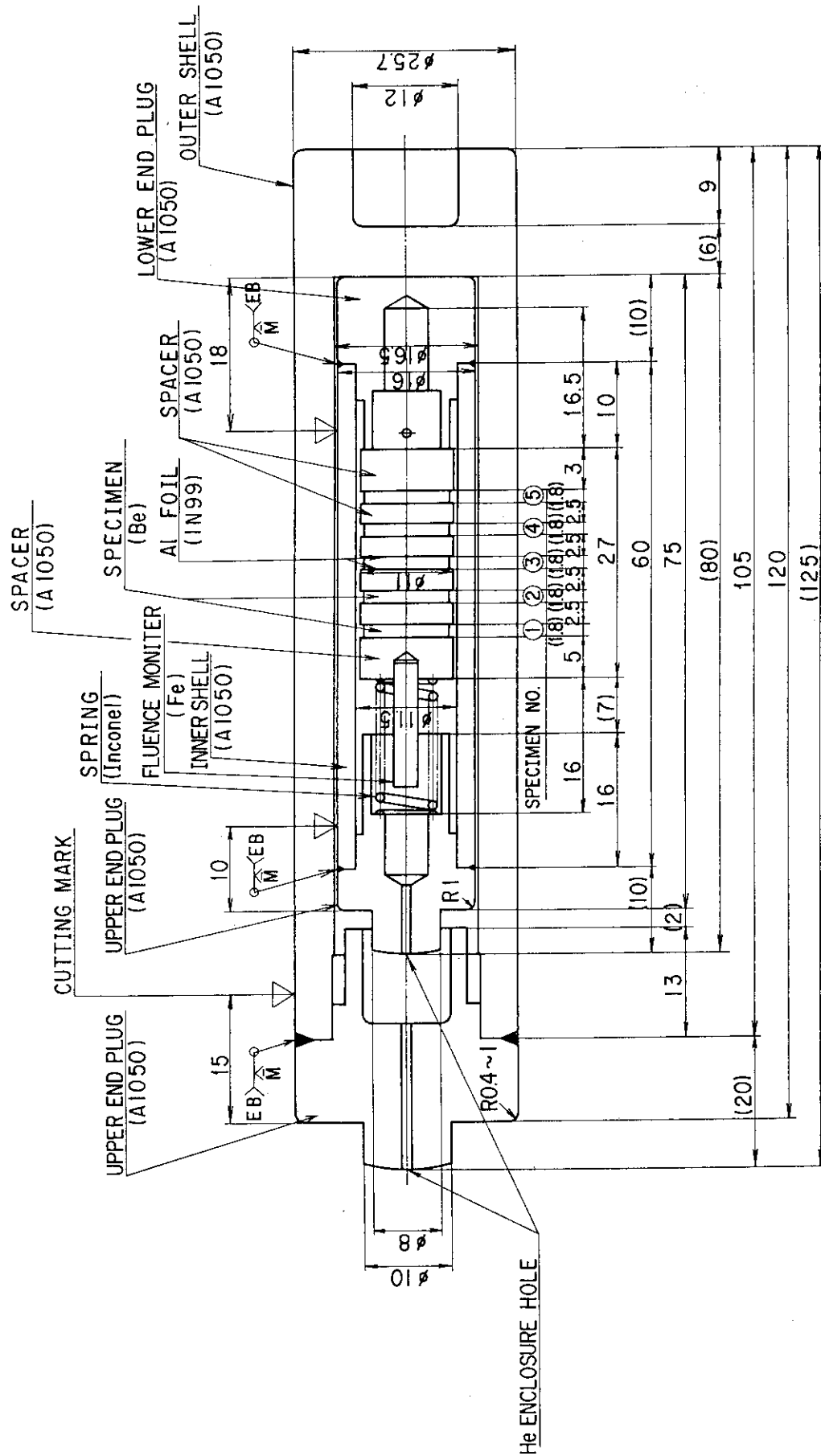


Fig. 4 Outline of inner capsule A

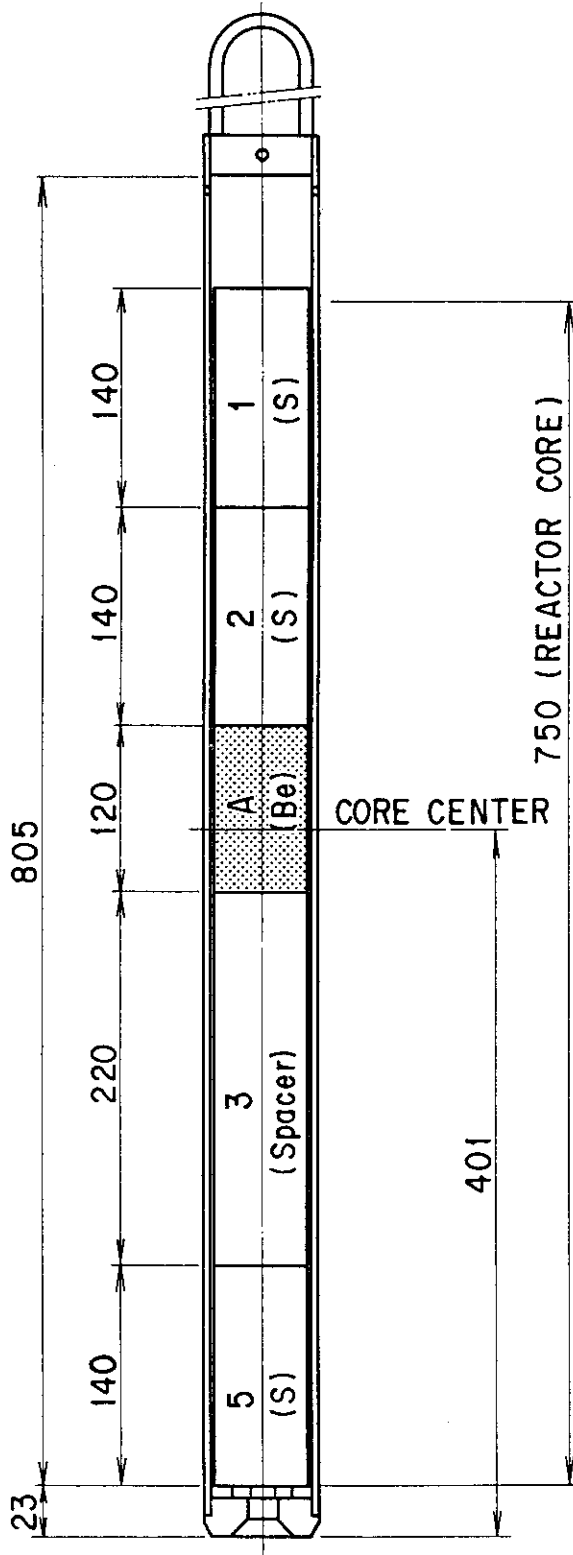


Fig. 5 Arrangement diagram of inner-capsule A in capsule name Cap-1

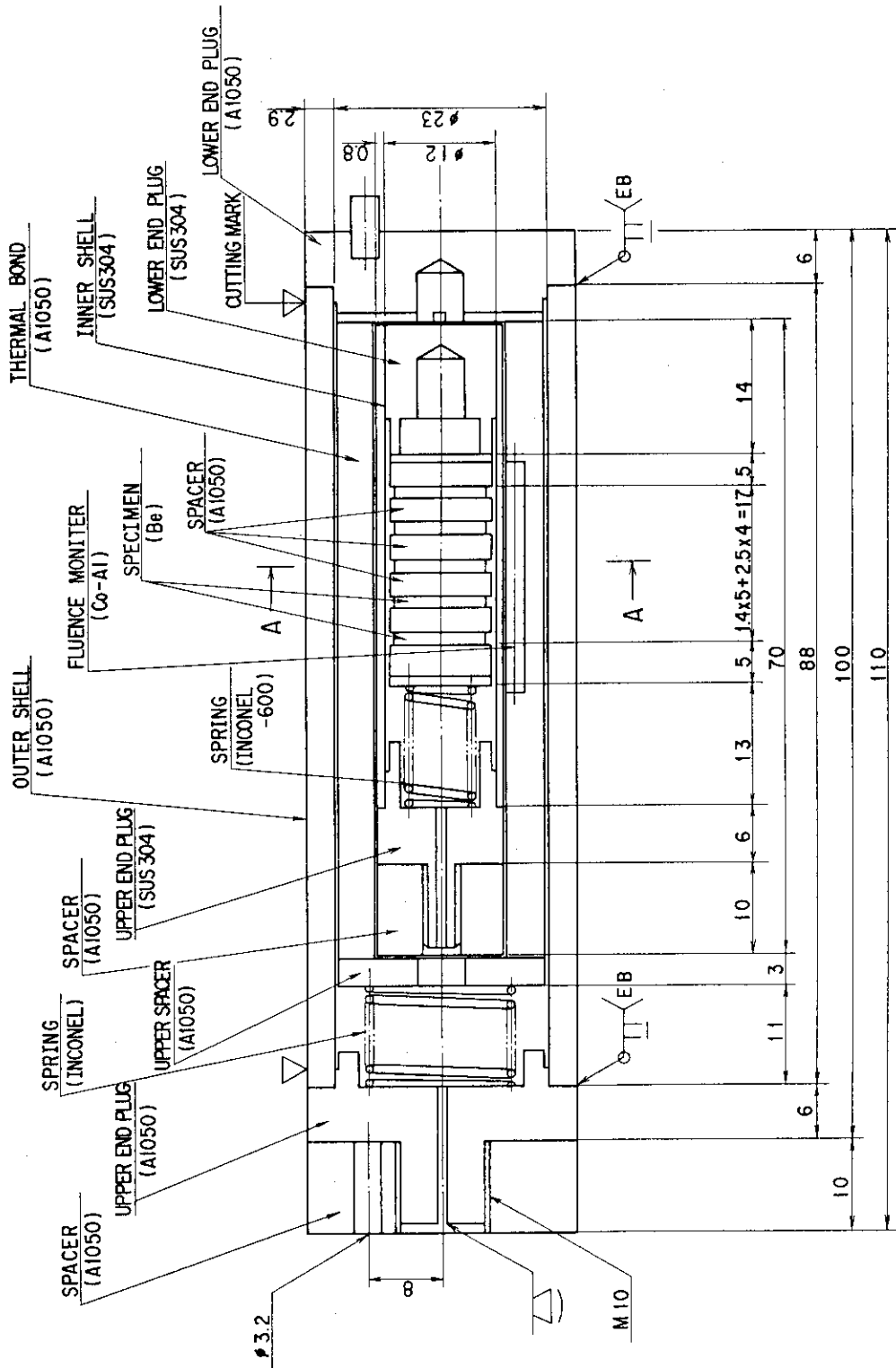


Fig. 6 Outline of inner-capsule B

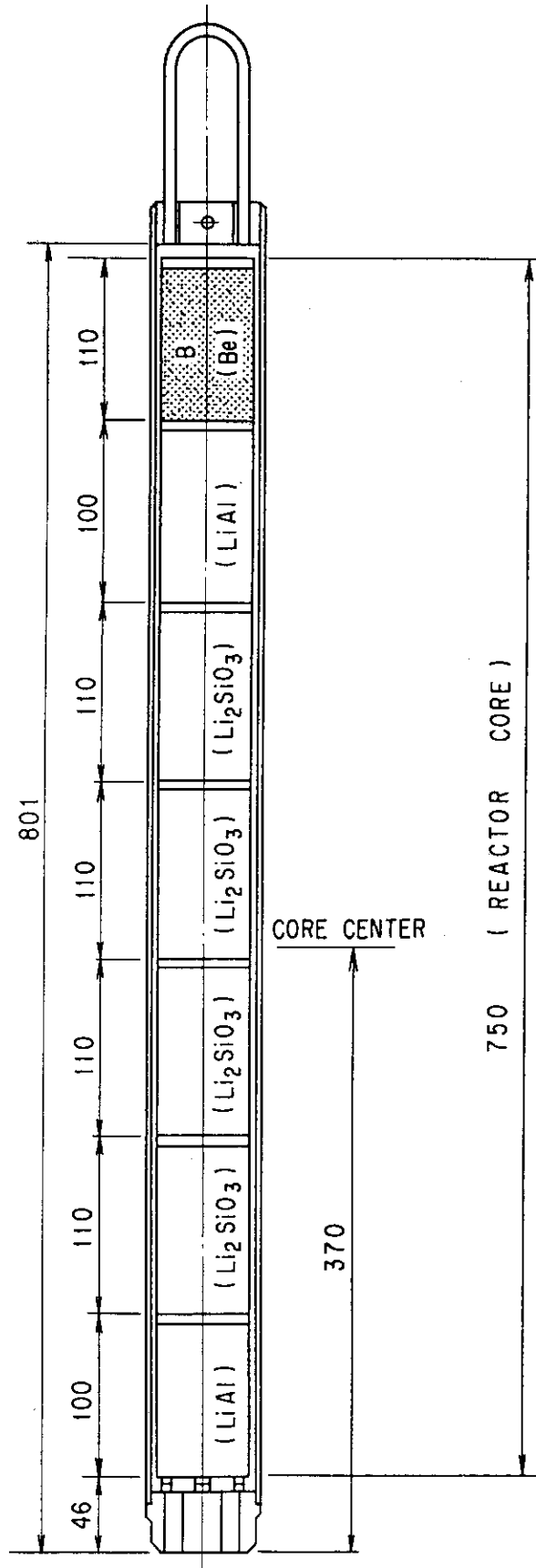


Fig. 7 Arrangement diagram of inner-capsule B in capsule name Cap-2

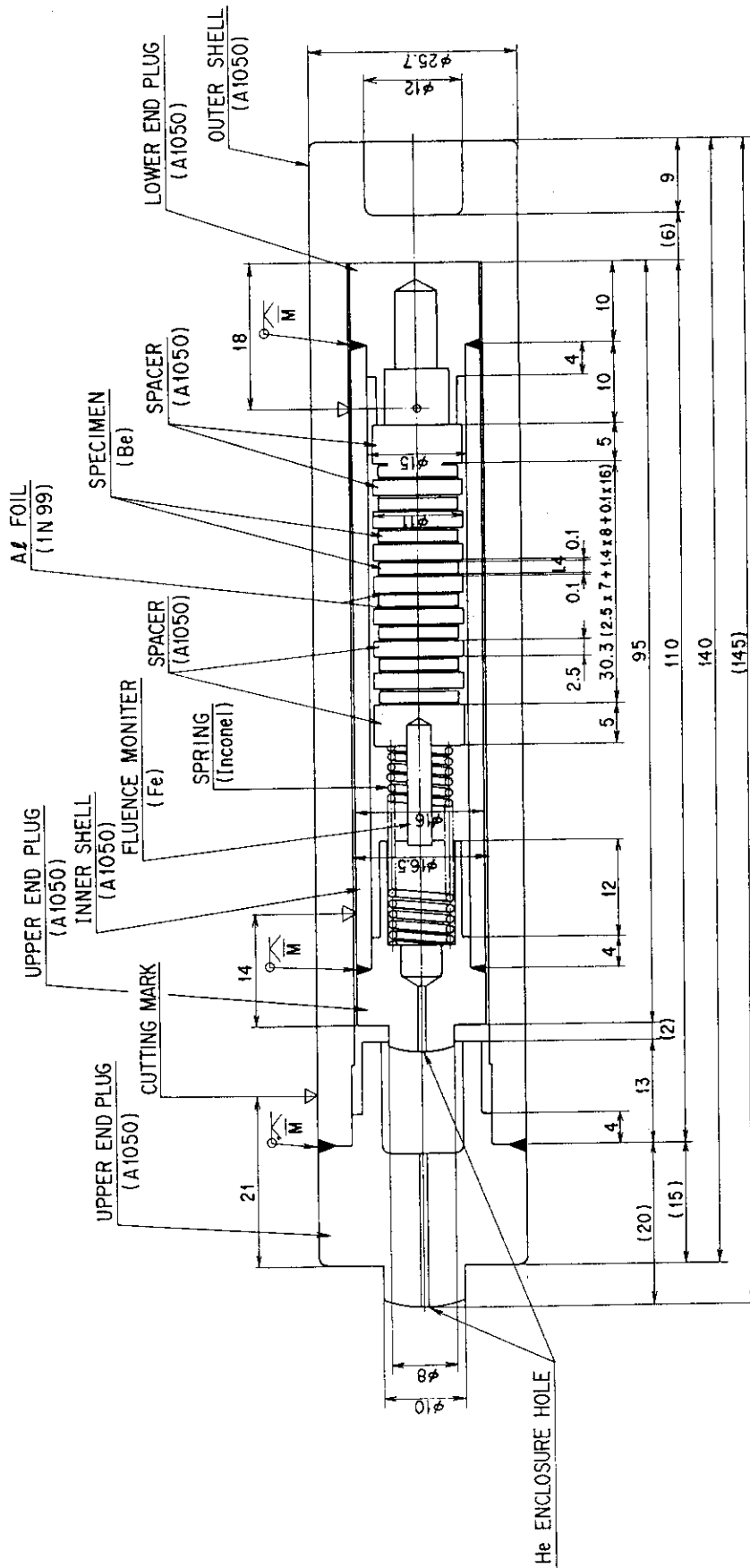


Fig. 8 Outline of inner-capsule C



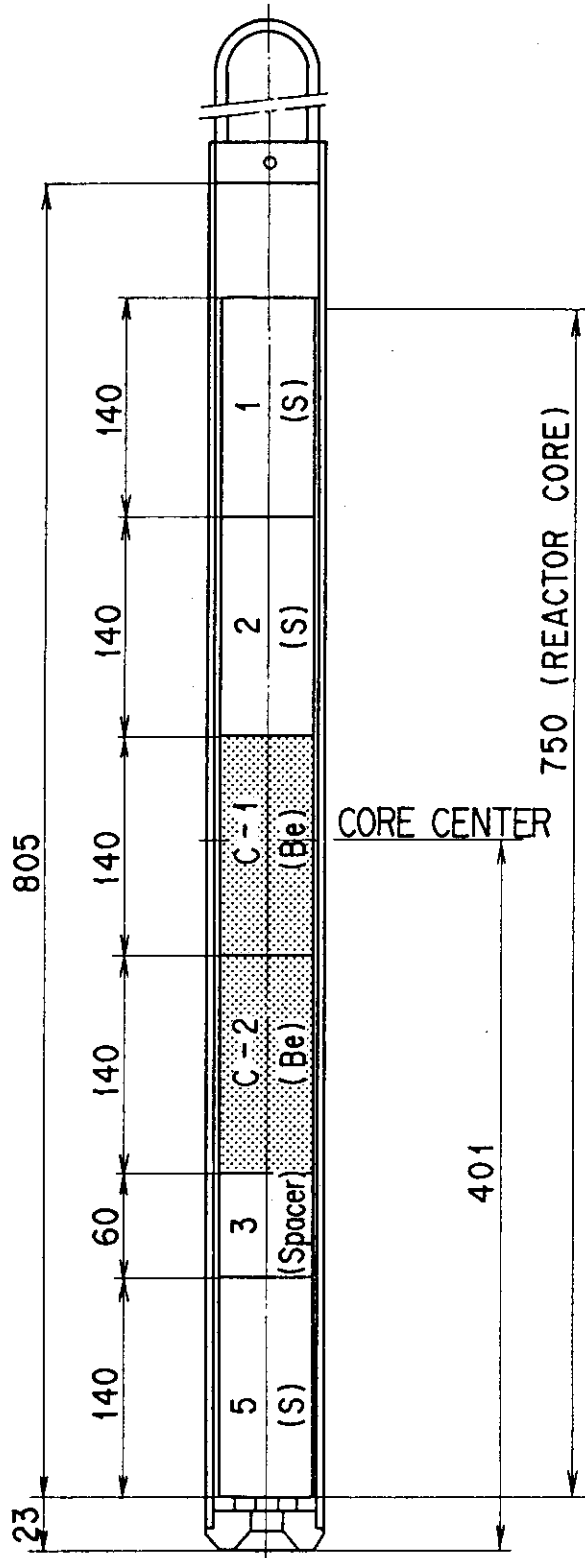


Fig. 9 Arrangement diagram of inner-capsule C in capsule name Cap-3

### 3. 照射試料の照射時温度計算結果

各キャプセルに入れられているベリリウム試料の照射時温度を一次元熱計算コード GENGTC<sup>17)</sup>により求めた結果を以下に示す。

#### (1) Cap-1 及び Cap-3 について

両キャプセルは構造が同一であり、照射領域も同じであるため、ベリリウム試料の照射温度も同じとなる。主な計算条件を以下に示す。尚、物質依存係数とは、鉄の  $r$  加熱率を 1 としたときの他の物質の  $r$  加熱率の比率を意味するものである。

- ① 一次冷却水温度      50      °C
- ② 外筒表面熱伝達率    1.19   W/cm<sup>2</sup>/°C
- ③ 鉄の  $r$  加熱率        10      W/g

尚、(物質依存係数)<sub>Be</sub> = 0.65, (物質依存係数)<sub>Al</sub> = 0.07

(注) ベリリウム試料の (n,  $\alpha$ ) 反応による発熱は考慮しなかった。

本計算に用いたキャプセル内の寸法及び計算結果を各々 Fig. 10 及び Fig. 11 に示す。ベリリウム試料の中心温度と外面温度はほぼ同じで約 230 °C となった。本計算コードは安全解析用の計算コードであり、多少過大評価しているものと思われる。

#### (2) Cap-2 について

主な計算条件を以下に示す。

- ① 一次冷却水温度      50      °C
- ② 外筒表面熱伝達率    1.19   W/cm<sup>2</sup>
- ③ 鉄の  $r$  加熱率        3.5     W/g

尚、(物理依存係数)<sub>Be</sub> = 0.65, (物理依存係数)<sub>Al</sub> = 0.80

(注) ベリリウム試料の (n,  $\alpha$ ) 反応による発熱は考慮しなかった。

本計算に用いたキャプセル内の寸法及び計算結果を Fig. 12 及び Fig. 13 に示す。ベリリウム試料の中心温度と外面温度はほぼ同じで約 130 °C となった。

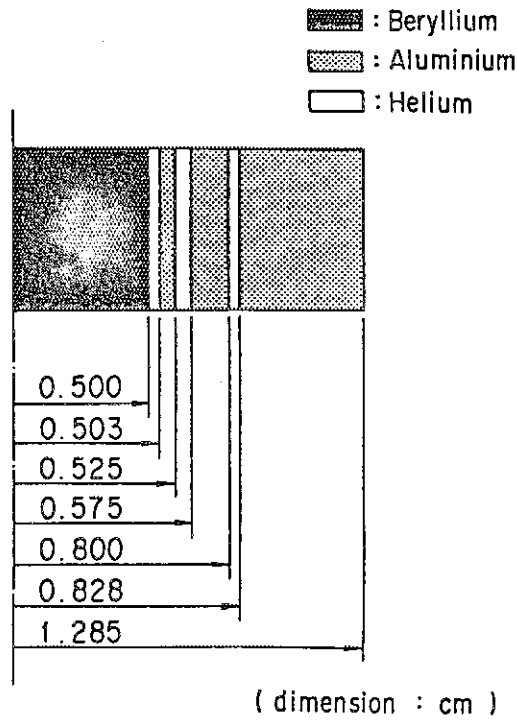


Fig. 10 Detailed dimension of capsule name Cap-1 and name Cap-3

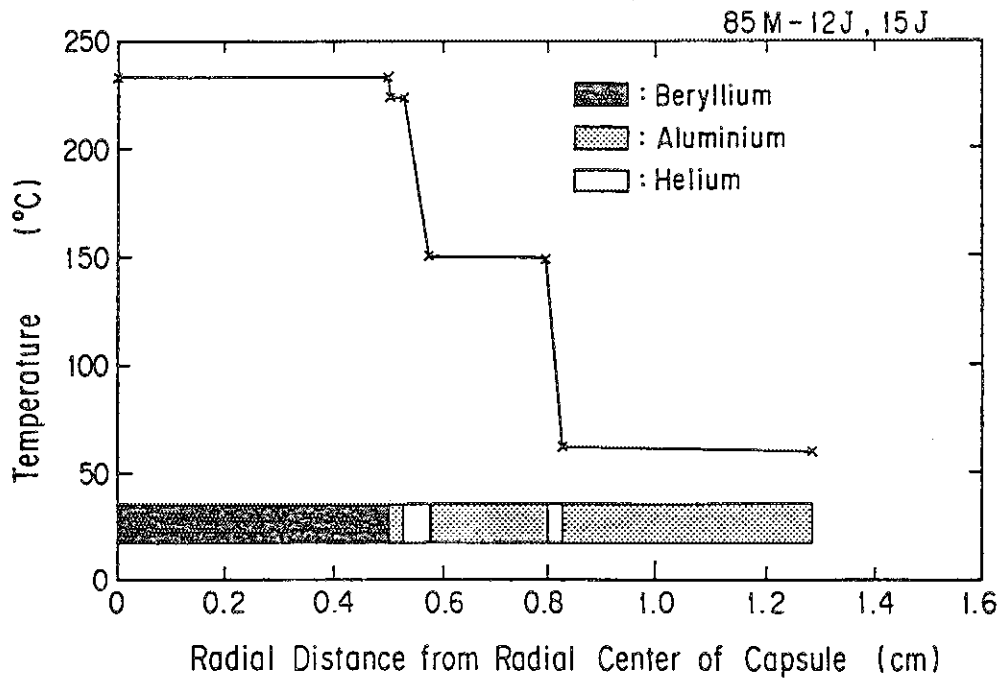


Fig. 11 Results of thermal calculation by GENGTC code on capsule name Cap-1 and name Cap-3

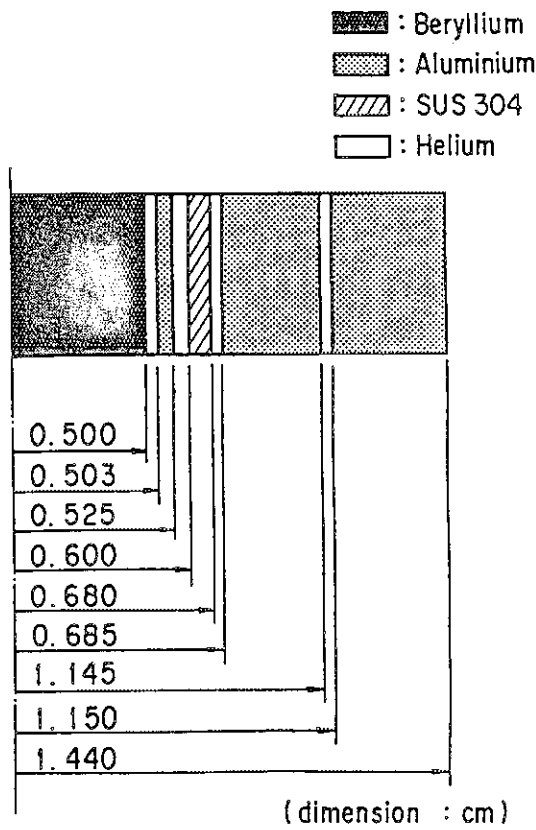


Fig. 12 Detailed dimension of capsule name Cap-2

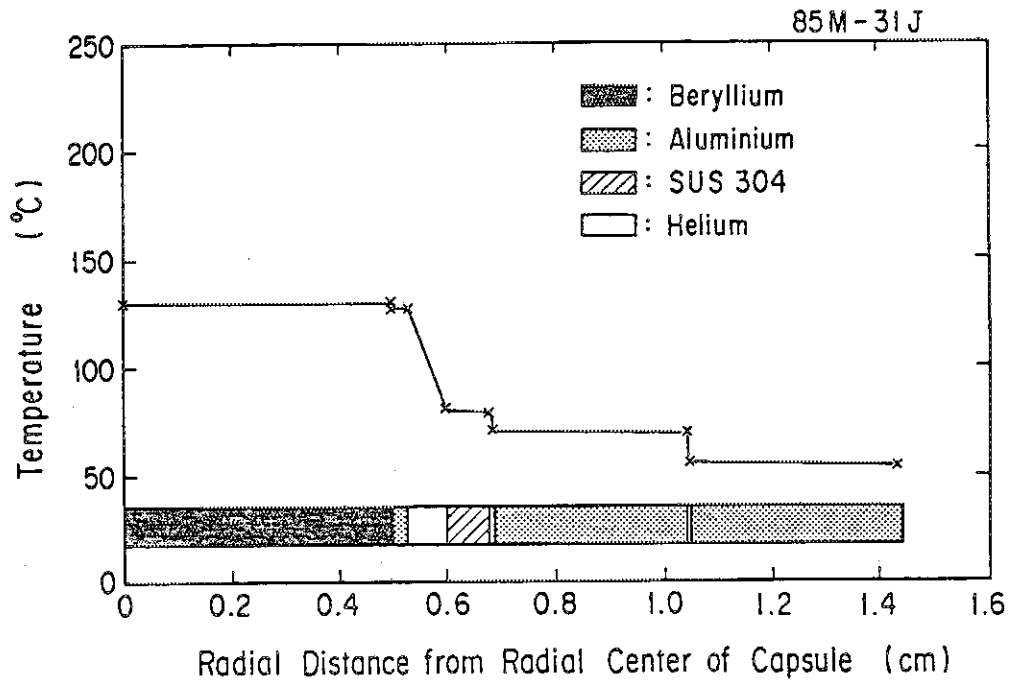
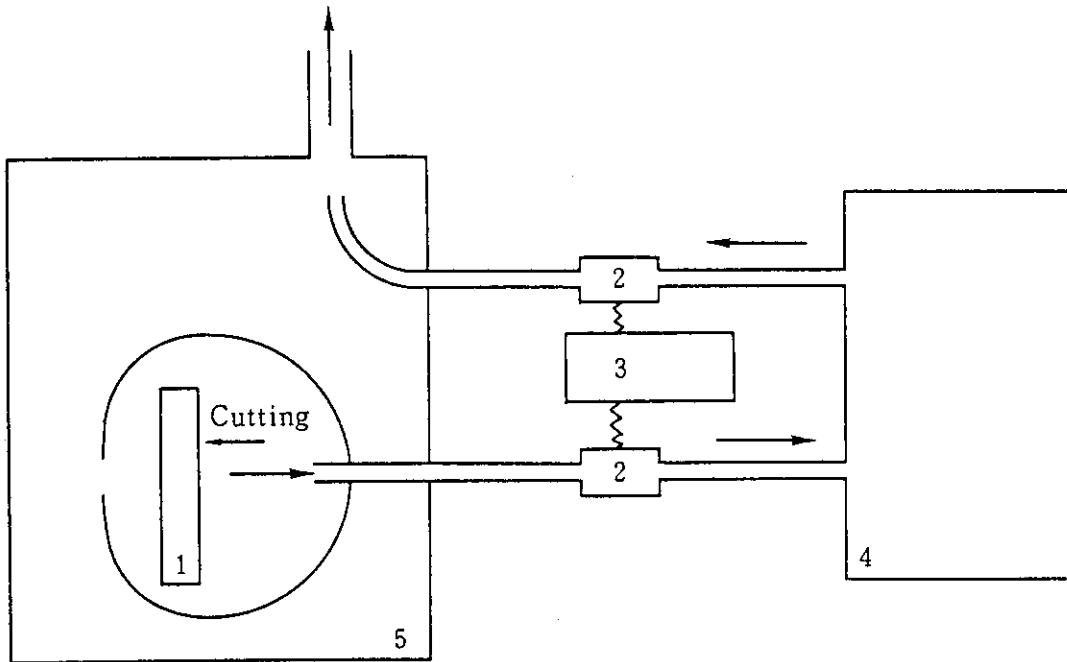


Fig. 13 Results of thermal calculation by GENGTC code on capsule name Cap-2

#### 4. 試料容器のパンクチャー試験結果

Table 7に示されているインナーキャプセルA内の試料容器を照射後に切断することによって、試料容器内のHeガス中に含まれているトリチウム量を求め、ベリリウム中に生成したトリチウムがどれだけ容器内に放出されているかについて調べた。本実験は、まずグローブボックス内に照射容器を入れ、それをビニール袋で包み、袋内でのこぎりにより照射容器を切断し、袋内のガスを吸引しながら、校正されたイオンチェンバーによってトリチウム量の定量を行なった。実験系の概略をFig. 14に示すとともに、イオンチェンバーの電気信号記録結果をFig. 15に示す。尚、試料容器内の容積は $2.41\text{ cm}^3$ で、ガス流量は $2.92\text{ l/h}$ であった。Fig.15より容器内のトリチウム量は、 $2.07 \times 10^{-4}\text{ }\mu\text{Ci/cm}^3$ であり、従って、容器内のトリチウム全量は約 $6\text{ }\mu\text{Ci}$ であることが分かった。本結果について以下に考察を加える。

容器に充填されているヘリウム中には、不純物として $^3\text{He}$ が約 $1.3 \times 10^{-4}\%$ 含まれており、その $^3\text{He}$ の(n, p)反応でトリチウムが生成される。その生成量は、計算により約 $4.3\text{ }\mu\text{Ci}$ となった。これらの結果及びトリチウム量の定量誤差を考慮すると容器内のトリチウムの発生源はほぼHeガス中の不純物の $^3\text{He}$ であり、アルミニウムで包まれたベリリウムから容器内へのトリチウム放出はほとんど無かったものと思われる。



- 1 : Irradiation Container
- 2 : Ionization Chamber
- 3 : Recorder
- 4 : Tritium Removal Equipment
- 5 : Grove Box

Fig. 14 Outline of puncture testing flow

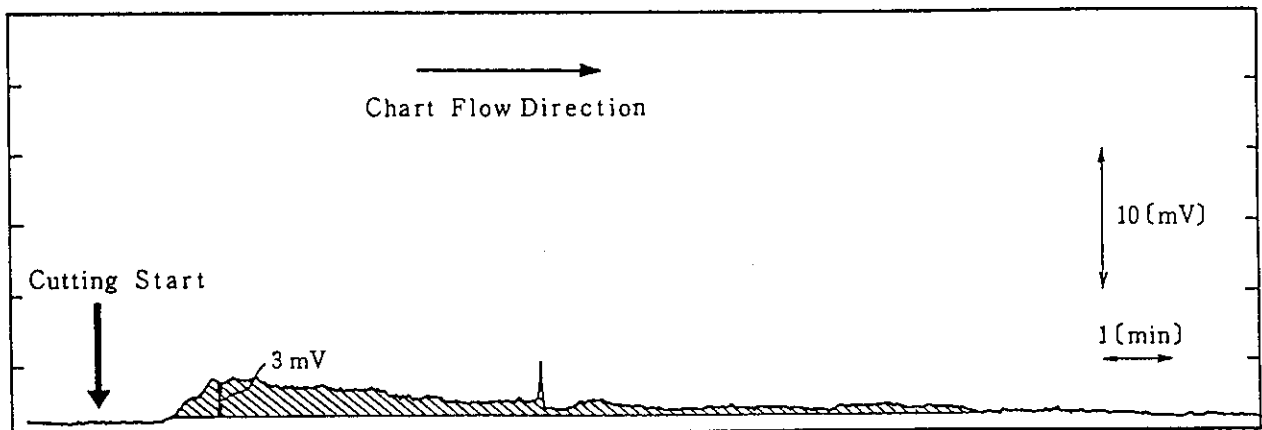


Fig. 15 Tritium activity in inner-capsule measured by ionization chamber

## 5. 結 論

ベリリウム中のトリチウム挙動を解明するために行なった中性子照射キャプセルの製作に関して得た知見を以下に示す。

- ① ベリリウム照射時温度が、キャプセルCap-1及びCap-3では約230℃、キャプセルCap-2では約130℃であることがわかった。
- ② 照射後に行なった試料容器のパンクチャー試験結果から、少なくとも上記の温度範囲の照射においては、ベリリウムから試料容器内へのトリチウム放出はほぼ無いことが明らかになった。

## 6. あ と が き

今回照射した試料を用いて以下に示した照射後試験を行なう予定である。

- ① 等温加熱によるベリリウム中のトリチウム放出挙動評価実験
- ② ベリリウムからのトリチウム反跳放出挙動評価実験
- ③ ベリリウムの金相変化等評価のための照射後試験
- ④ 水中昇温によるベリリウムからのトリチウム放出挙動評価実験
- ⑤ 電解研磨によるベリリウム中のトリチウム挙動評価実験

さらに、JMTRの1次冷却水に浸した状態で照射し、照射下でのベリリウムの水中酸化特性を評価するための試験を現在行なっているところである。

## 謝 辞

本報告書をまとめる上で、材料試験炉部部長二村嘉明氏、計画課長中田宏勝氏及び課長代理安藤弘栄氏に御助言を頂いた。ベリリウムの照射に関し、アイソトープ部・前製造課長保泉澄氏及び前製造課長代理山林尚道氏に便宜を計っていただいた。インナーキャプセルの製作に関し、技術部・工作課の浜野昇氏、沼田俊男氏、沢島求氏及び菊池泰二氏に御支援頂いた。また、試料容器のパンクチャー試験の実施に関しては、アイソトープ部の前研究開発課長守屋孝氏、同課の須貝宏行氏及び主任研究員棚瀬正和氏に御支援頂いた。

以上記して謝意を表します。

## 5. 結 論

ベリリウム中のトリチウム挙動を解明するために行なった中性子照射キャプセルの製作に関して得た知見を以下に示す。

- ① ベリリウム照射時温度が、キャプセルCap-1及びCap-3では約230℃、キャプセルCap-2では約130℃であることがわかった。
- ② 照射後に行なった試料容器のパンクチャー試験結果から、少なくとも上記の温度範囲の照射においては、ベリリウムから試料容器内へのトリチウム放出はほぼ無いことが明らかになった。

## 6. あ と が き

今回照射した試料を用いて以下に示した照射後試験を行なう予定である。

- ① 等温加熱によるベリリウム中のトリチウム放出挙動評価実験
- ② ベリリウムからのトリチウム反跳放出挙動評価実験
- ③ ベリリウムの金相変化等評価のための照射後試験
- ④ 水中昇温によるベリリウムからのトリチウム放出挙動評価実験
- ⑤ 電解研磨によるベリリウム中のトリチウム挙動評価実験

さらに、JMTRの1次冷却水に浸した状態で照射し、照射下でのベリリウムの水中酸化特性を評価するための試験を現在行なっているところである。

## 謝 辞

本報告書をまとめる上で、材料試験炉部部長二村嘉明氏、計画課長中田宏勝氏及び課長代理安藤弘栄氏に御助言を頂いた。ベリリウムの照射に関し、アイソトープ部・前製造課長保泉澄氏及び前製造課長代理山林尚道氏に便宜を計っていただいた。インナーキャプセルの製作に関し、技術部・工作課の浜野昇氏、沼田俊男氏、沢島求氏及び菊池泰二氏に御支援頂いた。また、試料容器のパンクチャー試験の実施に関しては、アイソトープ部の前研究開発課長守屋孝氏、同課の須貝宏行氏及び主任研究員棚瀬正和氏に御支援頂いた。

以上記して謝意を表します。



## 5. 結 論

ベリリウム中のトリチウム挙動を解明するために行なった中性子照射キャプセルの製作に関して得た知見を以下に示す。

- ① ベリリウム照射時温度が、キャプセルCap-1及びCap-3では約230℃、キャプセルCap-2では約130℃であることがわかった。
- ② 照射後に行なった試料容器のパンクチャー試験結果から、少なくとも上記の温度範囲の照射においては、ベリリウムから試料容器内へのトリチウム放出はほぼ無いことが明らかになった。

## 6. あ と が き

今回照射した試料を用いて以下に示した照射後試験を行なう予定である。

- ① 等温加熱によるベリリウム中のトリチウム放出挙動評価実験
- ② ベリリウムからのトリチウム反跳放出挙動評価実験
- ③ ベリリウムの金相変化等評価のための照射後試験
- ④ 水中昇温によるベリリウムからのトリチウム放出挙動評価実験
- ⑤ 電解研磨によるベリリウム中のトリチウム挙動評価実験

さらに、JMTRの1次冷却水に浸した状態で照射し、照射下でのベリリウムの水中酸化特性を評価するための試験を現在行なっているところである。

## 謝 辞

本報告書をまとめる上で、材料試験炉部部長二村嘉明氏、計画課長中田宏勝氏及び課長代理安藤弘栄氏に御助言を頂いた。ベリリウムの照射に関し、アイソトープ部・前製造課長保泉澄氏及び前製造課長代理山林尚道氏に便宜を計っていただいた。インナーキャプセルの製作に関し、技術部・工作課の浜野昇氏、沼田俊男氏、沢島求氏及び菊池泰二氏に御支援頂いた。また、試料容器のパンクチャー試験の実施に関しては、アイソトープ部の前研究開発課長守屋孝氏、同課の須貝宏行氏及び主任研究員棚瀬正和氏に御支援頂いた。

以上記して謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) James Stonehouse; "Physics and Chemistry of Beryllium". J. Vac. Sci. Technol., A4(3), (1986) 1163-
- 2) C.R. Tipton, Jr, et al; "Reactor Handbook 2nd Edition: Vol.1 Material", Interscience Publishers Inc., New York (1960) 897-
- 3) 材料試験炉部編; JAERI-M 83-053, "JMTR照射ハンドブック", (1983)
- 4) 太田 充; "核融合炉技術の現状と展望", 日本機械学会誌, 83, No.740 (1980) 775-
- 5) 宮原 昭; "核融合装置におけるプラズマ・壁相互作用", 日本原子力学会誌, 27, No.3 (1985) 196-
- 6) 山脇 道夫; "核融合炉材料工学-炉内材料", 核融合研究, 56, No.12 (1986) 96-
- 7) Starfire - A Commercial Tokamak Fusion Power Plant Study, ANL-FPP-80-1
- 8) P.H. Rebut and K.J. Dietz; "The First Wall in JET -Status and Perspectives-", Proceeding of 12th Symposium on Fusion Technology, 1 (1983) 85-
- 9) M.F. Smith and A.W. Mullendore; "An Evaluation of Beryllium for Magnetic Fusion Components", J. Nucl. Mat., 122 & 123 (1984) 855-
- 10) P.H. Edmonds, et al; "The ISX-JET Beryllium Limiter Experiment", J. Nucl. Mat., 128 & 129 (1984) 422-
- 11) J. Hackmann and J. Uhlenbusch; "Test of a Beryllium Limiter in the TOKAMAK UNITOR", J. Nucl. Mat., 128 & 129 (1984) 418-
- 12) エヌ・ア・ガラクチオーノワ; "金属内の水素", 日ソ通信社 (1972)
- 13) C.E. Ells and W. Evans; AECL-1347, "The Behavior of Hydrogen in Beryllium", (1961)
- 14) J.P. Pemsler, R.W. Anderson and E.J. Rapperport; ASD-TDR-62-1018, "Solubility and Diffusion of Gases in Beryllium" (1963)
- 15) J.P. Pemsler and E.J. Rapperport; "Hydrogen in Proton-Bomberded Beryllium: Agglomeration and Diffusion", Trans. Met. Soc. AIWE, 230 (1964) 90-
- 16) P.M.S. Jones and R. Gibson; "Hydrogen in Beryllium", J. Nucl. Mater., 21 (1967) 353
- 17) 野村 靖; 私信

## 付録 A

## ベリリウムの原子力分野への利用

## A.1 用途概要

用途は、材料によっておおよそ3つに分類できる。以下に概略を示す。

## (1) ベリリウム銅

ベリリウム銅は、銅にベリリウムを3%以下加えたものを主体とし、これにコバルト、銀、ニッケル等を必要に応じて適量添加して用いられる。ベリリウム含有量により用途は異なるが、一般的には導電バネ材料に使われるものが多く、耐摩耗性、耐食性、非磁性等の特性を生かした鋳鍛造材として海底中継用きょう体、航空機用金型にも用いられている。

## (2) 金属ベリリウム

金属ベリリウムは、比重(1.84)、剛性、核的性質、音の伝授速度等に特異な性質を有していることから試験研究炉の中性子反射体、動力炉の中性子源、X線窓材、理化学機器、音響用スピーカー、航空・宇宙用構造材、電子顕微鏡部品等に用いられている。さらに、核融合炉においては中性子増倍材として用いられようとしている。

## (3) ベリリウム酸化物

ベリリウム酸化物は通常焼結材にし、主に半導体の放熱部品や高温測定用熱電対の絶縁材として用いられている。

## A.2 需 要

ベリリウムは、生産者、消費者のみならず、政府によってさえも備蓄される傾向にあり、戦略的にも重要になってきている。そのため、ベリリウムに関する情報が機密事項と見なされる場合もあり、需要情報の公表を妨げている原因の1つと考えられる。数少ない需要情報の1つである日本碍子(株)の資料から、日本を100にした場合の概略需要指数を以下に示す。

## (1) バネ用ベリリウム銅合金

米国：420，欧州：125，東南アジア：20，ソ連・中国：不明

## (2) 金属ベリリウム

米国：1000～20000，欧州：500～1000，ソ連・中国：不明

## A.3 JMTRの利用状況

JMTRにおいては、ホットプレス(焼結)法によって製作された金属ベリリウムを中性子反射材として炉心内で用いており、利用されている場所及び形から、それらは、H枠、反射体要素及びプラグに大別されている。第83サイクル後半の炉心配置図(Fig. A. 1)を用いて以下に概説する。

## (1) H枠について

H枠は7段構造で、炉心に固定されており、約5年毎に交換されている。「H枠」という名

称はHの形に似ていることから起因しており、照射試験用キャプセルを装荷するために2種類の穴（照射孔）があげられている。1つはHの横棒に相当する北壁の照射孔G-5～L-5にあいている穴（ $\phi 38\text{mm}$ ）で、もう1つはHの縦棒に相当する東壁照射孔N-6～13と西壁照射孔E-6～13にあいている穴（ $\phi 32\text{mm}$ ）である。北壁、東壁及び西壁の図面を各々 Fig. A. 2, Fig. A. 3 及び Fig. A. 4 に示す。尚、7段構造を区別するために、例えば、北壁、東壁と西壁の2段目の場合には各々N2, E2及びW2と呼ぶことにする。

### (2) 反射体要素について

反射体要素はベリリウム製のものとアルミニウム製のものがあり、合計で42体用いられている。2種類の反射体要素の使用割合は、全ての利用者の照射希望条件を満足するように炉心配置を核計算により検討することによって決定される。第83サイクル後半ではベリリウム製反射体要素は36体用いられた。ベリリウム製反射体要素の図面を Fig. A. 5 に示す。尚、照射試験用キャプセルを装荷するための穴の直径は42mmである。

### (3) プラグについて

H枠及び反射体要素に照射試験用キャプセルを装荷するための穴（照射孔）が設けられているが、照射試験用キャプセルが装荷されない場合にはその穴を埋めるためにプラグが入れられることになる。プラグはプラグ直径により3種類（ $\phi 40\text{mm}$ 、 $\phi 36\text{mm}$  及び  $\phi 30\text{mm}$ ）に分類されている。それらのプラグの炉心内最大装荷本数は、各々42本、6本及び16本であり、第83サイクル後半には各々29本、4本及び12本装荷された。尚、 $\phi 40\text{mm}$ のプラグは反射体要素用であり、それ以外の2種類のプラグはH枠用である。これらのプラグ図面を Fig. A. 6 に示す。第83サイクル後半に J M T R 炉心内で用いられたベリリウムの全重量は約500 kgであった。参考のためにH枠、反射体及びプラグの表面積、体積及び重量を Table A. 1 に示す。尚、H枠は北壁、東壁と西壁の7段全てを加えた値であり、それ以外は1体或は1本当たりの値である。

Table A.1 Surface area, volume and weight of beryllium reflectors

		Surface Area (cm <sup>2</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )	Weight (g)
H-typed Flame		$1.33 \times 10^5$	$1.31 \times 10^5$	$2.41 \times 10^5$
Element		$4.58 \times 10^3$	$2.61 \times 10^3$	$4.80 \times 10^3$
Plug	$\phi$ 40 mm	$1.07 \times 10^3$	$1.09 \times 10^3$	$2.01 \times 10^3$
	$\phi$ 36 mm	$7.78 \times 10^2$	$8.73 \times 10^2$	$1.61 \times 10^3$
	$\phi$ 30 mm	$5.39 \times 10^2$	$7.26 \times 10^2$	$1.34 \times 10^3$

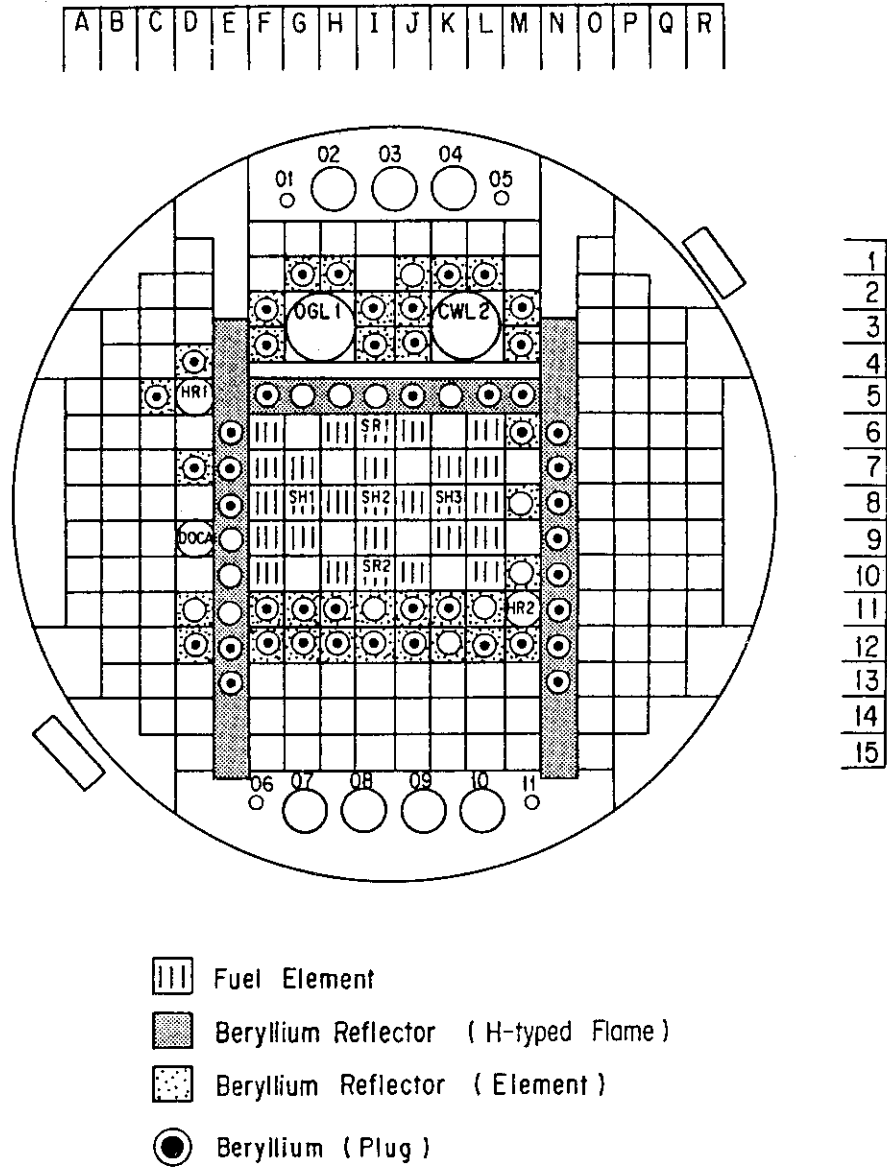
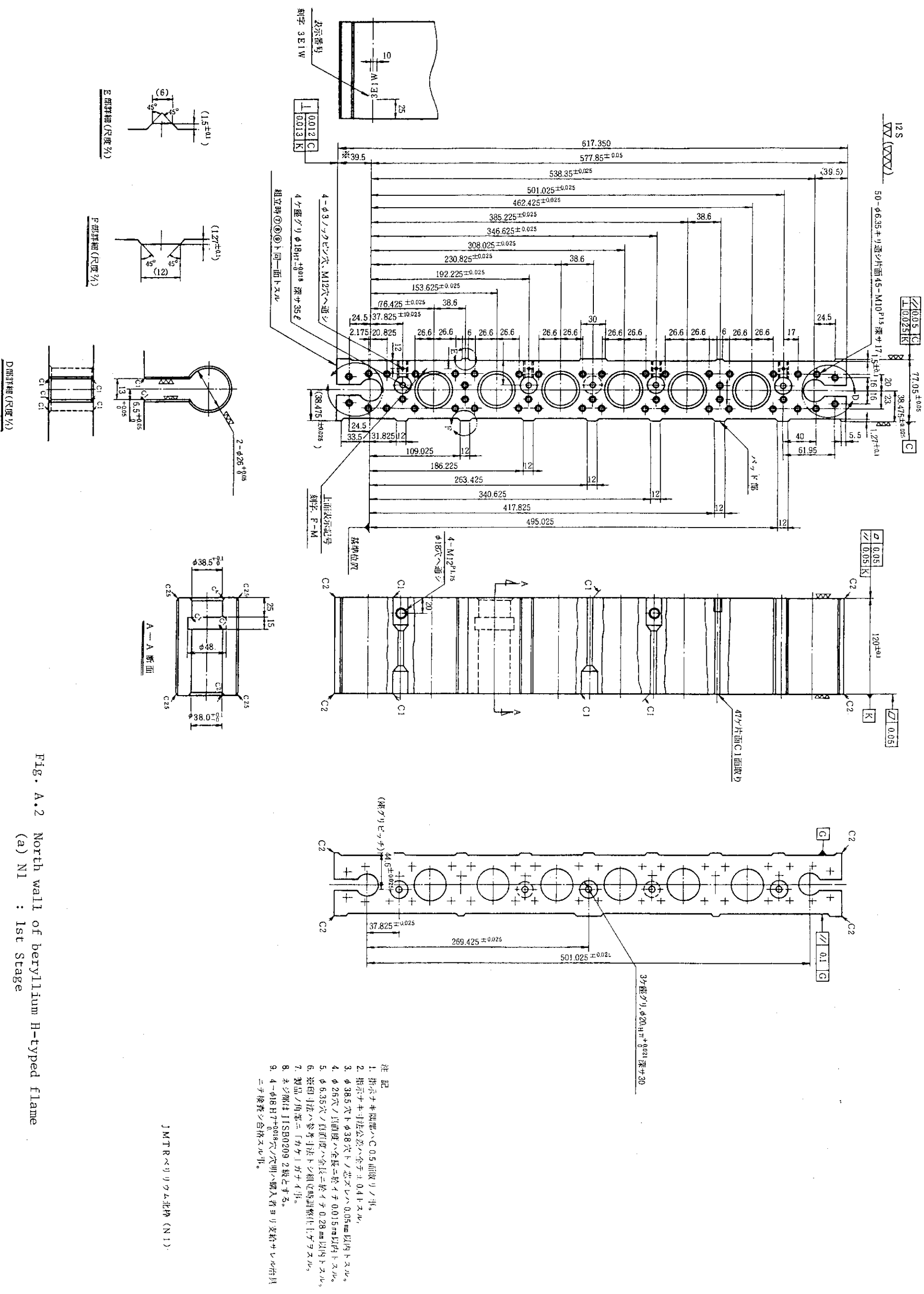


Fig. A.1 Reactor core configuration of JMTR 83rd operation cycle



- 注記
1. 指示寸法は公差のC 0.5 面取りノ事。
  2. 指示寸法は公差の全寸 ± 0.4 となる。
  3. φ 38.5 穴の公差は 0.05 mm 以内とする。
  4. φ 26 穴の公差は全長に於いて 0.015 mm 以内とする。
  5. φ 5.35 穴の公差は全長に於いて 0.28 mm 以内とする。
  6. 加工寸法は参考寸法との相違を調整して加工する。
  7. 製品の角部は「カケ」加工する。
  8. ネジ部は JIS B 209 2 級とする。
  9. 4-φ18 H7<sup>+0.018</sup>/g6 穴の不明な記入者より支給される器具にて検査合格する事。

JMTR-ベリリウム北壁 (N1)

Fig. A.2 North wall of beryllium H-typed flame  
(a) NI : 1st Stage





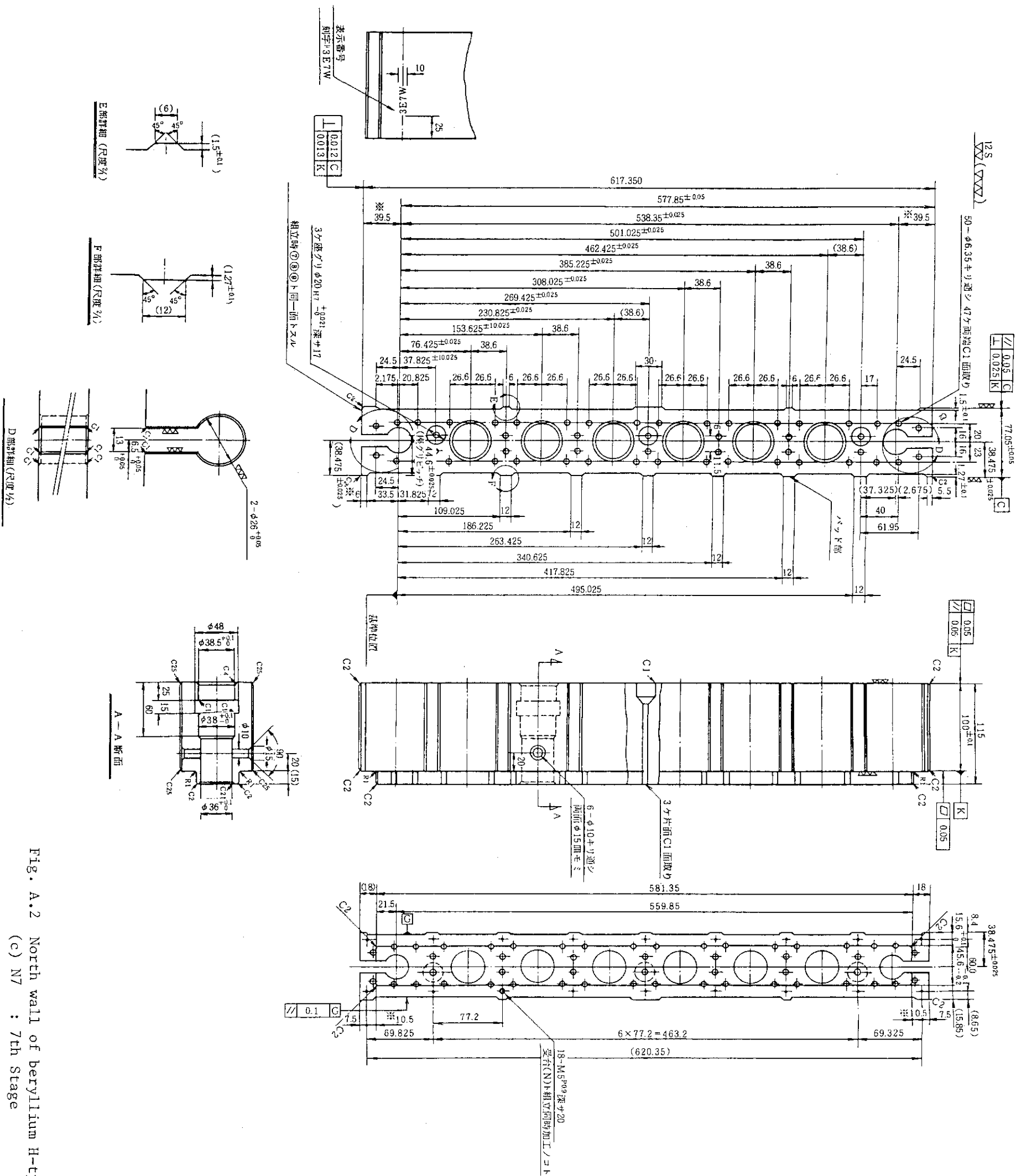


Fig. A.2 North wall of beryllium H-typed flame  
(c) N7 : 7th Stage

- 注記
1. 指示寸法は、各部のC 0.05 精度の事。
  2. 指示寸法は、公称寸法 ± 0.4 トナル。
  3. φ 38.5 穴は、φ 36 トノ芯ズレハ、0.05 mm 以内トナル。
  4. φ 38 穴ハ、φ 36 トノ芯ズレハ、0.05 mm 以内トナル。
  5. φ 26 穴ノ真直度ハ、全長ニ於テ、0.013 mm 以内トナル。
  6. φ 6.35 穴ノ真直度ハ、全長ニ於テ、0.27 mm 以内トナル。
  7. 指示寸法ハ、参考寸法トシテ、粗立同時調整仕テナル。
  8. 製品ノ角部ニ「カケ」ガキナシ。
  9. ネジ部ハ、JIS B 0209 2 級トナル。

JMTR<リ>ラグラム西岸 (N7)



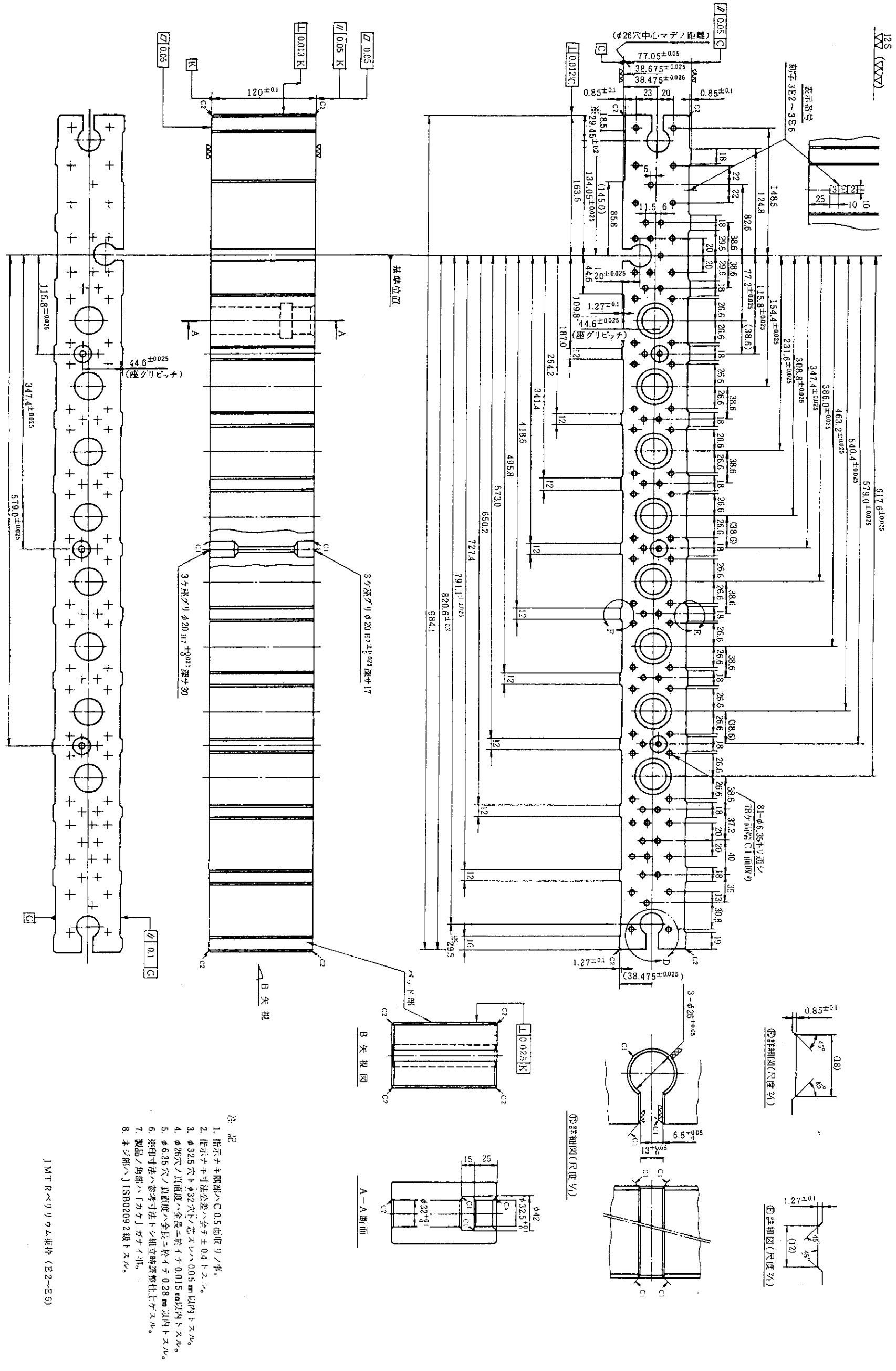


Fig. A.3 East wall of beryllium H-typed flame  
(b) E2~E6: 2nd to 6th Stage (Each stage is the same construction.)

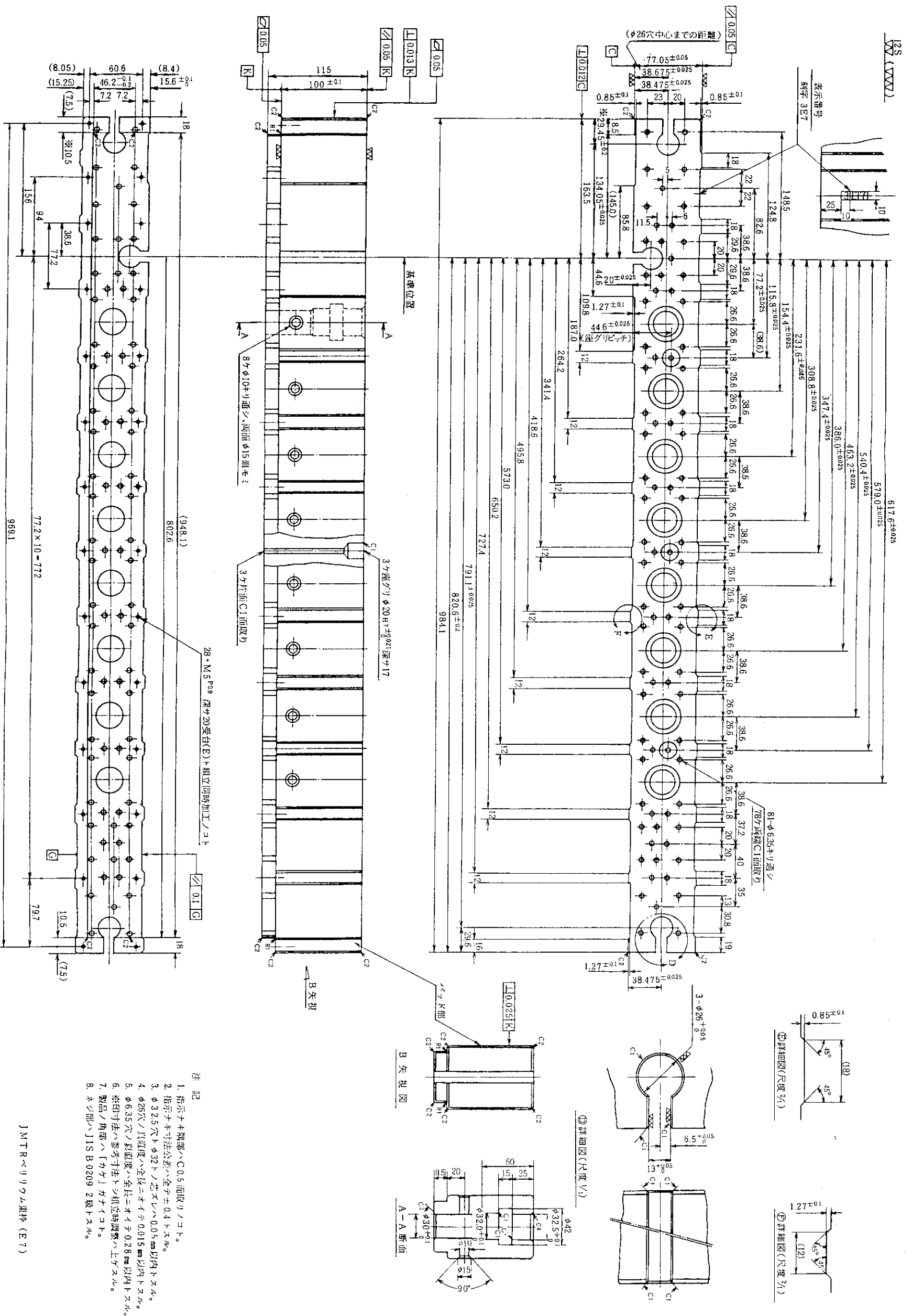


Fig. A.3 East wall of beryllium H-typed flame  
(c) E7 : 7th Stage

JMTR-リリウム束管 (E7)

- 注記
1. 指示子+隅部へC0.5面取りノコト。
  2. 指示子+寸法公差: 全寸 ± 0.4トスル。
  3. φ32.5穴トφ32トノ差スレハ0.05mm以内トスル。
  4. φ26穴ノ真直度ハ全長ニオテ0.015mm以内トスル。
  5. φ6.35穴ノ真直度ハ全長ニオテ0.28mm以内トスル。
  6. 密印寸法ハ参考寸法トシ相立時調整ハ上テスル。
  7. 製品ノ角部ハ「カチ」ガチノコト。
  8. キシ部ハJIS B 0209 2級トスル。

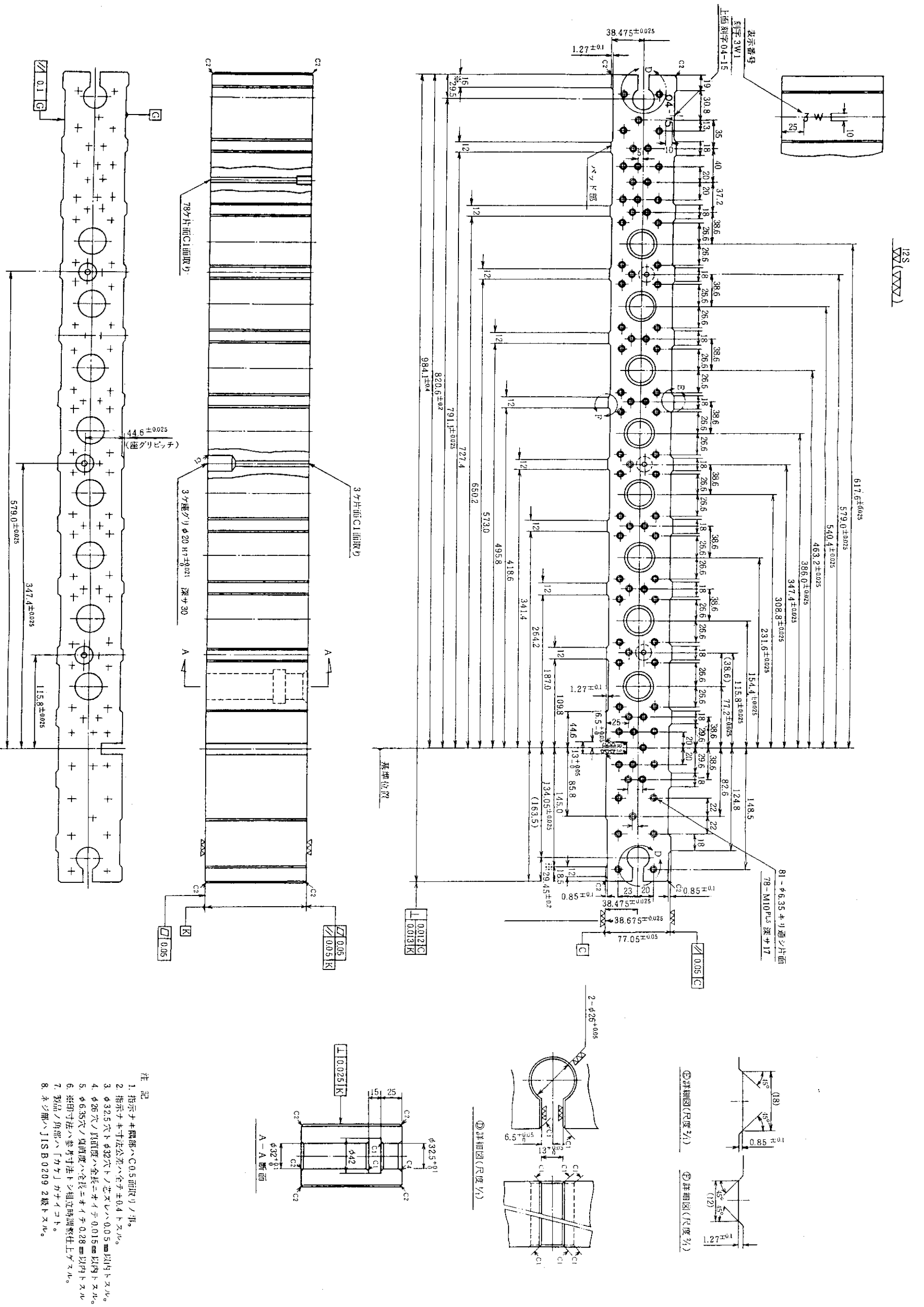


Fig. A.4 West wall of beryllium H-typed flame (a) W1 : 1st Stage

JMTR-リリラニ再称 (W1)

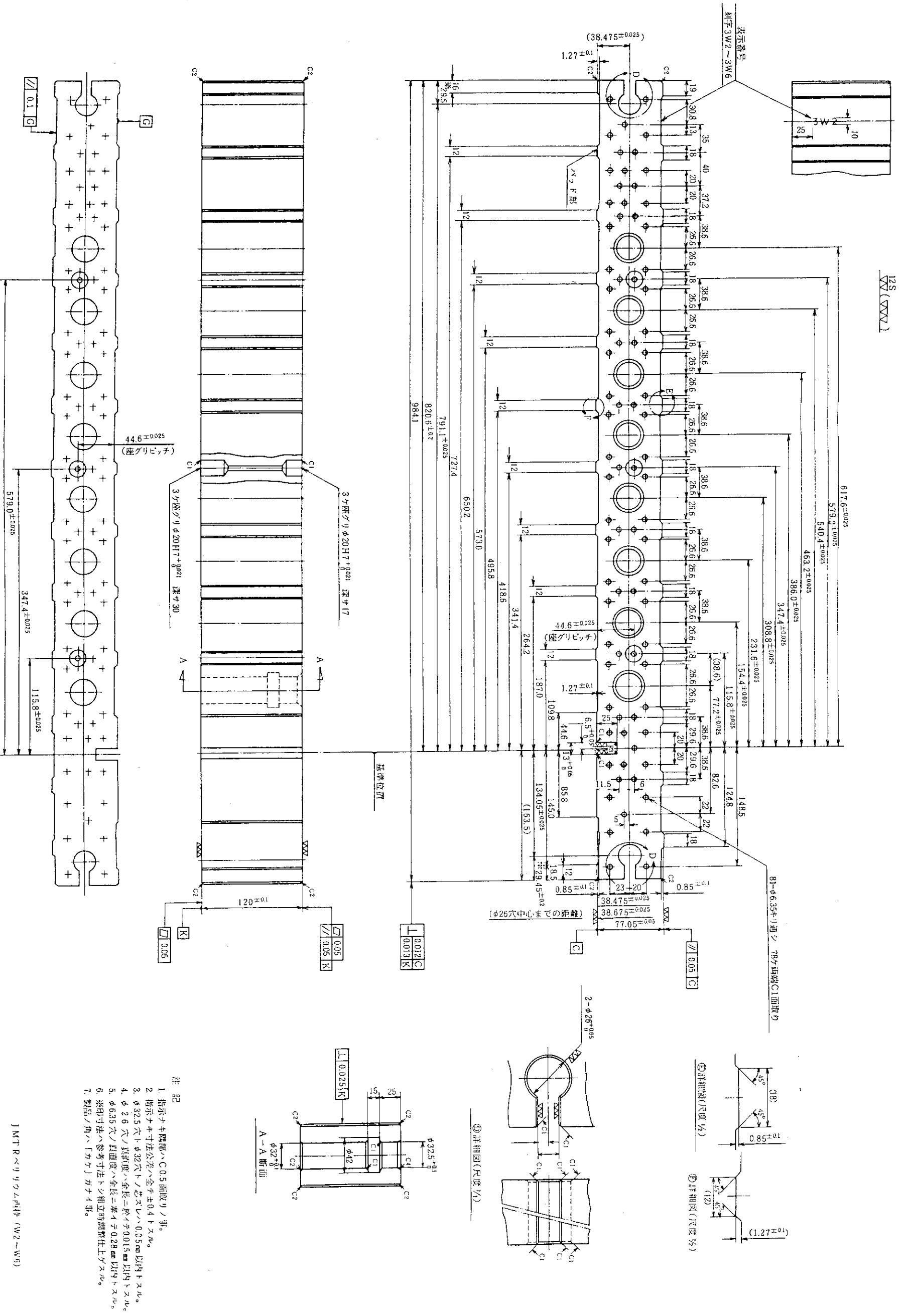


Fig. A.4 West wall of beryllium H-typed Flame

(b) W2~W6: 2nd to 6th Stage (Each stage is the same construction.)

- 注記
- 1 指示寸法は概ね±0.5mm以内とする。
  - 2 指示寸法公差は全寸±0.4mmとする。
  - 3 φ32.5穴はφ32穴との差を±0.05mm以内とする。
  - 4 φ2.6穴の深さは全長±0.015mm以内とする。
  - 5 φ6.35穴の深さは全長±0.028mm以内とする。
  - 6 添付寸法は参考寸法と相立時期に修正される。
  - 7 製造時角ハ「カケ」ガナリ事。

J MTR-ベリリウム炉 (W2~W6)

125 (XXX)

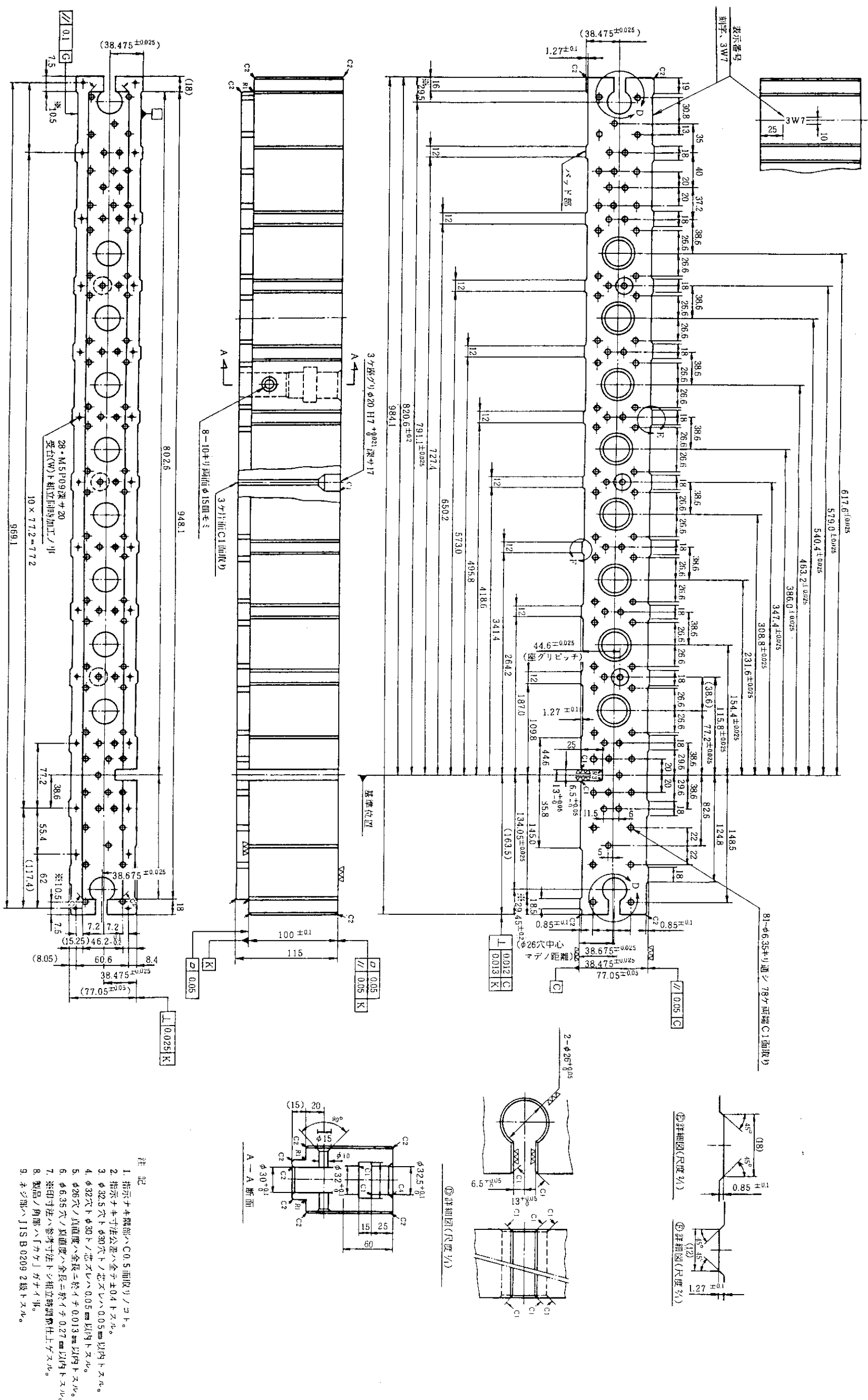


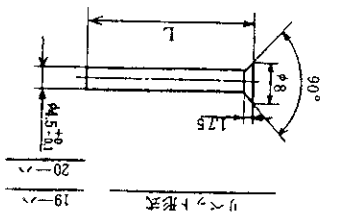
Fig. A.4 West wall of beryllium H-typed flame (C) W7 : 7th Stage

JMTR-ベリリウム西壁 (W7)

- 注記
1. 指示寸法は公差C0.5の面取りノコト。
  2. 指示寸法公差は全寸±0.4トスル。
  3. φ32.5穴トφ30穴トノ芯ズレハ0.05mm以内トスル。
  4. φ32穴トφ30穴トノ芯ズレハ0.05mm以内トスル。
  5. φ26穴ノ真直度ハ全長ニ於テ0.013mm以内トスル。
  6. φ6.35穴ノ真直度ハ全長ニ於テ0.27mm以内トスル。
  7. 捺印寸法ハ参考寸法トシ相立調整責任トスル。
  8. 製品ノ角部ハ「カケ」ガナラズ。
  9. ネジ部ハJIS B 0209 2級トスル。



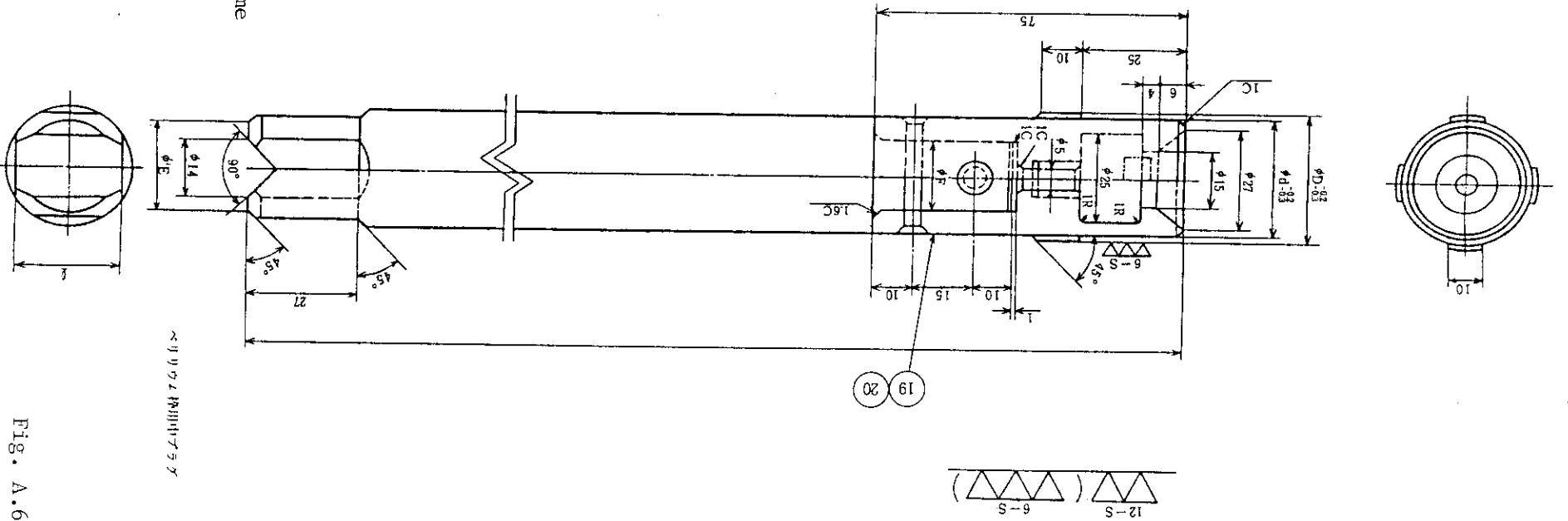




品番	L
19-ハ	36
20-ハ	41

品番	φD	φE	φF	φG	φH
20	37.5	36	28	30	23 <sup>+0.021</sup> <sub>-0.013</sub>
19	31.5	30	24	26	18 <sup>+0.018</sup> <sub>-0.011</sub>

(a) Plug using in H-typed flame



(b) Plug using in element

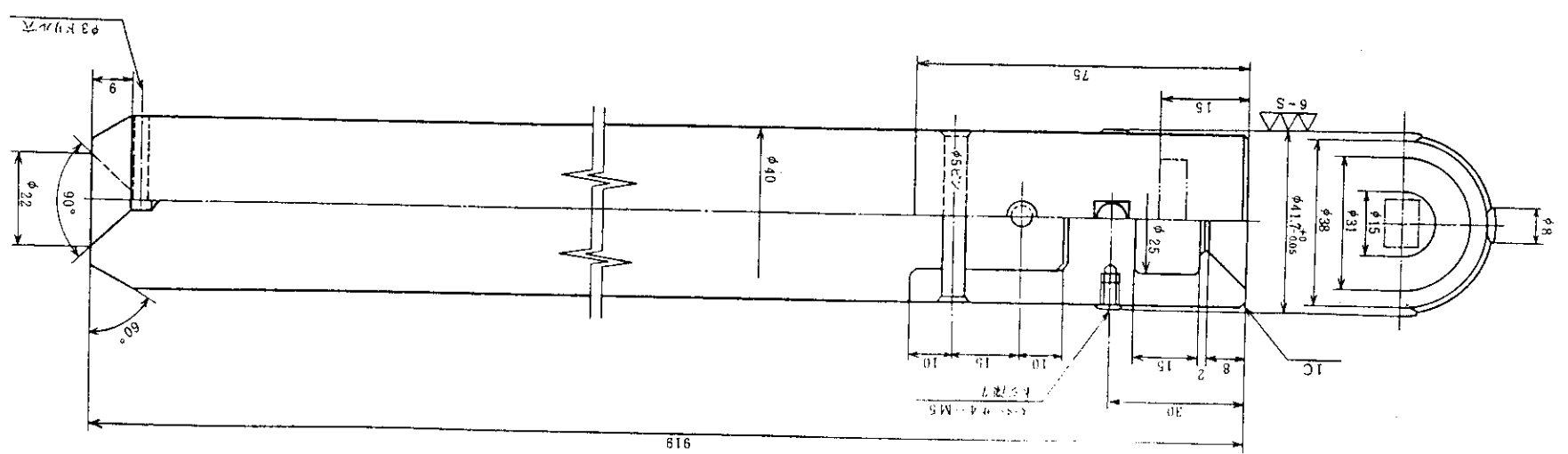


Fig. A.6 Configuration of beryllium plug