

JAERI-M
89-182

工業照射用大出力X線発生ターゲットの開発

1989年11月

須永 博美・田中 進・金沢 孝夫・上松 敬
四本 圭一・田中 隆一・吉田 健三・谷口 周一*
水沢 健一*・鈴木 光顕*・坂本 勇*

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、お申しこしてください。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 日立高速印刷株式会社

工業照射用大出力X線発生ターゲットの開発

日本原子力研究所高崎研究所開発部

須永 博美・田中 進⁺・金沢 孝夫・上松 敬⁺
四本 圭一・田中 隆一⁺・吉田 健三・谷口 周一^{*}
水沢 健一^{*}・鈴木 光顕^{*}・坂本 勇^{*}

(1989年10月16日受理)

制動放射X線を放射線加工処理に利用するため、照射用電子加速器に取り付けるX線発生用ターゲットを開発した。

実用規模のX線源に用いる電子加速器としては5 MeV, 300 kWの性能を仮定した。ターゲット設計に必要な基礎データは、電子線の吸収、散乱、X線発生などの相互作用データをモンテカルロ計算コードを用いて取得した。また、ターゲット設計のための工学的なデータを得るため、既設の2 MeV, 60 kWの電子加速器に取り付ける水冷式の“平板型”および“湾曲型”の2種類の実験用ターゲットを試作し、その特性試験を行った。その結果、“湾曲型”が優れた性能を示した。

これらの検討結果に基づき、“湾曲型”の実用規模ターゲットの設計を行った。

Development of High-power X-ray Generation Target for Radiation
Processing

Hiromi SUNAGA, Susumu TANAKA⁺, Takao KANAZAWA, Takashi AGEMATSU⁺
Keiichi YOTSUMOTO, Ryuichi TANAKA⁺, Kenzho YOSHIDA
Shuichi TANIGUCHI^{*}, Kenichi MIZUSAWA^{*}, Mitsuaki SUZUKI^{*}
and Isamu SAKAMOTO^{*}

Department of Development
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received October 16, 1989)

An X-ray generation target system attaching to an electron irradiator was developed for application of bremsstrahlung radiation to radiation processing. For designing an industrial X-ray source, the electron accelerator assumed to provide the beam power of 5 MeV, 300 kW. Two different type targets, "plane plate" and "curvature types", were made on trial basis to obtain the engineering data required for the target design, and were installed under a 2 MeV, 60 kW electron irradiator for testing X-ray generation.

The result showed that the "curvature type" had good performance for high-power X-ray generation.

A "curvature type" target for industrial use was designed based on above results.

keywords : Radiation Processing, Radiation Source, Electron Accelerator,
Bremsstrahlung Radiation, X-ray Generation Target

+ Office of Advanced Radiation Technology Project

* Nissin-High Voltage Co. Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. ターゲットの設計条件	2
2.1 X線源として用いる電子加速器	2
2.2 ターゲットの構造, 材質	3
3. ターゲット設計に係わる基礎データ	5
4. 実験用ターゲットの設計, 試作	10
4.1 設計	10
4.2 試作	14
5. 試作した実験用ターゲットの特性試験	20
5.1 特性試験の目的, 概要	20
5.2 結果	20
5.3 特性試験結果のまとめ, 考察	21
6. 実用規模ターゲットの設計	25
6.1 ターゲットの方式	25
6.2 設計	25
7. まとめ	29
8. あとがき	30
引用文献	30

Contents

1. Introduction	1
2. Basic design of X-ray generation target	2
2.1 Electron accelerator for X-ray source	2
2.2 Basic structure and materials of X-ray generation target	3
3. Basic data for target design	5
4. Design and trial manufacture of testing target	10
4.1 Design of testing target	10
4.2 Trial manufacture of testing target	14
5. Performance of testing target	20
5.1 Purpose of the test	20
5.2 Results of the test	20
5.3 Summary of the test	21
6. Design of industrial target	25
6.1 Type of the target	25
6.2 Design of the target	25
7. Summary	29
8. Conclusion	30
References	30

1. はじめに

電子線やガンマ線による放射線加工処理の実用化は幅広い分野にわたり着実な進展をみせている。

このうち電子線を用いたプロセスとしては、絶縁電線、発泡ポリエチレン、熱収縮チューブなど各種プラスチック製品の製造や、タイヤの部分架橋、塗膜のキュアリングなど多くの例があげられる¹⁾。これらの加工処理に用いられる電子加速器の出力性能は、いわゆる低エネルギーといわれる150 keV程度から中エネルギーの3 MeV程度までのエネルギーを有し、ビーム電流については100 mAをこえるものまで、多岐にわたっている。このように加速器による加工処理が進展してきた要因としては加速器性能の著しい向上があり、大出力、高信頼性を有する装置が製作されるようになったことが挙げられる。とりわけ我国はこの加速器製作においては先進的な役割を果たすまでになっている。

一方、高透過力を要する照射加工のためのコバルト-60線源を用いたガンマ線によるプロセスについては、北海道士幌における馬鈴薯の発芽防止のための施設の稼動開始(1973年)以後徐々に照射産業としての施設が作られてきたが、近年になり、特に医療器具の滅菌を目的とする施設の稼動が相次いでいる²⁾。この高透過力を有する放射線による照射利用も今後大きく進展することが予想される。このための放射線源としては現在のところ専らコバルト-60が用いられており、そのほとんどは外国からの輸入に頼っているのが現状である。

このように国内の電子加速器製作技術の進歩と、高透過力を有する放射線の照射利用の拡大の見通しを考え合わせると、加速器から放出される電子線をターゲットに衝突させた際に発生する制動放射X線を照射加工に利用する方法について検討を進めることは意義有ることと考えられる³⁾。

電子加速器をX線源として用いる方法をコバルト-60などのアイソトープを用いた場合と比較すると、(1)線源自身の安全管理上の問題が少ない、(2)ラジオアイソトープのように放射線発生量の自然減衰もなく、放射線強度の制御が容易である、(3)X線放出に方向性があり、高い利用効率が得易い、(4)ターゲットの取りはずしを可能にすれば電子線、X線両用の線源として利用できる、(5)線源コストとして有利となり得る……など多くの利点が考えられる。このX線による方法を実用化するには、高エネルギー、大出力加速器、X線発生用ターゲットおよび有効な照射方法の開発など、解決を要する技術的課題がある。

そこで、これらの課題に取り組むこととし、まずX線発生用ターゲットの開発についての検討を進めた。

2. ターゲットの設計条件

2.1 X線源として用いる電子加速器

X線源として実用化する場合に用いる電子加速器の選定には次の要件が挙げられる。

- 1) X線による照射プロセスに適した出力性能が得られる加速器であること、
- 2) 長時間連続運転が行える高い信頼性を有する加速器であること。

出力性能のうち、加速電圧は電子線のX線への変換効率、X線の透過性能、X線照射された物質に誘導放射能を発生させるか否か、等を決する重要なパラメーターである。X線への変換効率は電子のエネルギーが高くなることにより高くなり、またX線の透過能力も上がり、経済性の面からは有利となる。しかしX線エネルギーの増加とともに照射試料中の誘導放射能の問題が生じ、照射加工用としてはX線エネルギーが10MeVを越えるのは現実的でない。なお、食品照射の分野では、FAO/WHOの食品照射規格委員会が1983年に決めた「照射食品に対する一般基準」、「食品照射施設の運営に関する実施基準」の中で、「5MeV以下のエネルギーの機械的に発生させたX線」と、X線について規定しており、将来、食品照射がX線プロセスとしての可能性を有していることを考えると、この5MeV以下という値には注目する必要がある。

ビーム電流については、できるだけ大きく取れることがX線発生量の増大につながり、照射処理速度が上げられることになり、経済的に有利であると考えられる。

上記出力性能についての検討をもとにして、適切な電子加速器について考えると、コッククロフト型や電子リニアックなどが挙げられる。

コッククロフト型電子加速器は国産で3MV、100kWの出力性能を有する装置が既に数年前に製作されており、放射線加工処理用電子加速器として十分な信頼性と実績を有している。さらに我々の検討によれば、この方式で加速電圧5MV、ビーム電流60mA程度の装置の製作が可能な見通しが得られている。

一方電子リニアックは従来、原子核実験などの分野で多く用いられてきたが、最近では放射線加工処理用としても開発が進められ、高エネルギーの電子線源、X線源として有望となってきている。

今回は現在までの放射線加工処理用の加速器の製作および利用の実績を勘案し、また将来の加工処理の対象として食品照射が有望であることを考慮した結果、電子加速器は加速電圧5MV、ビーム電流60mA、ビーム走査幅120cmのコッククロフト型を想定した。

電子線のX線への変換効率は、5MeV電子ではおよそ10%となり、ビーム電流60mAの300kW加速器の場合には30kWのX線出力となる。これは約200万Ciのコバルト-60線源の等価ということになり、放射線加工処理用として十分に実用的な線源と成り得る。

実用化をめざしたターゲットの設計に必要な工学的データを得るため、まず既存の電子加速器に取り付けて使用するターゲットの設計、試作から始めることとした。そのための加速器と

して、高崎研に設置してある日新ハイボルトージュ(株)製の2MV, 30mA, コッククロフト型加速器⁴⁾(1号加速器)を用いることにした。1号加速器はビームを垂直および水平方向に取り出せることが特徴となっており、X線源は利用上水平ビームが有利と考え、この水平ビームでX線を発生させる方式のターゲットの試作を進めることとした。

2.2 ターゲットの構造, 材質

放射線加工処理に用いられる電子加速器では、300keV以下の低エネルギーの装置で線形フィラメントを用いている場合を除き、ビームは走査されて加速器のビーム窓から放出される。

Fig. 2.1は1号加速器から放出される電子線の電子流密度分布の測定例を示す。

電子加速器をX線源として用いる場合においても、X線の広い均一な照射場が得られるよう、一定幅に走査した電子線がターゲットに入射してX線を発生する方式が適切と考えられる。したがってターゲットの電子線入射面の形状は上記の分布を示すような電子線が入射するような長方形とするのが一般的である。

電子線の透過方向についてのターゲットの構造は、X線を発生する物質(X線発生体)のほか冷却を行う部分が必要となる。冷却方法は水冷式が適切と考えられる。Fig. 2.2は電子の透過方向についての基本構造図を示す。ここに示す各部の備えるべき条件は次のようになる。まずX線発生体については

- 1) 電子線のX線への変換効率が高くなるように高原子番号物質であること、
- 2) 耐放射線性、耐熱性および耐腐蝕性に優れた物質であること、
- 3) 冷却水の水圧に耐えられるよう、機械的強度の高いものであること、
- 4) 板材として得られる物質であること。

また、冷却部の底板としては

- 1) 耐放射線性および耐腐蝕性に優れた物質であること、
- 2) 機械的強度が高いものであること、
- 3) 加工性に優れていること。

これらの条件に適合する材料としては、X線発生体として、金、タングステン、タンタルなどが、また底板としてはステンレスが挙げられる。X線発生体にはこのほか高原子番号である劣化ウランの使用⁵⁾を検討しているところもあるが、日本においては核燃料物質としての法的規制を受けるので、この使用は現実的ではない。

今回の検討で2MV, 30mAの出力の加速器に取り付けて使用出来るターゲットの設計、試作を行うこととしたが、X線発生体としては次の理由でタンタルを選定した。

- 1) X線への変換効率は金やタングステンとほぼ同じであるが、価格は金に比べて安価、
- 2) タングステンに比べ加工性に優れ、ターゲットの試作を進めるためには適した材料と考えられる。
- 3) その他上記のターゲットとして備えるべき条件を有している。

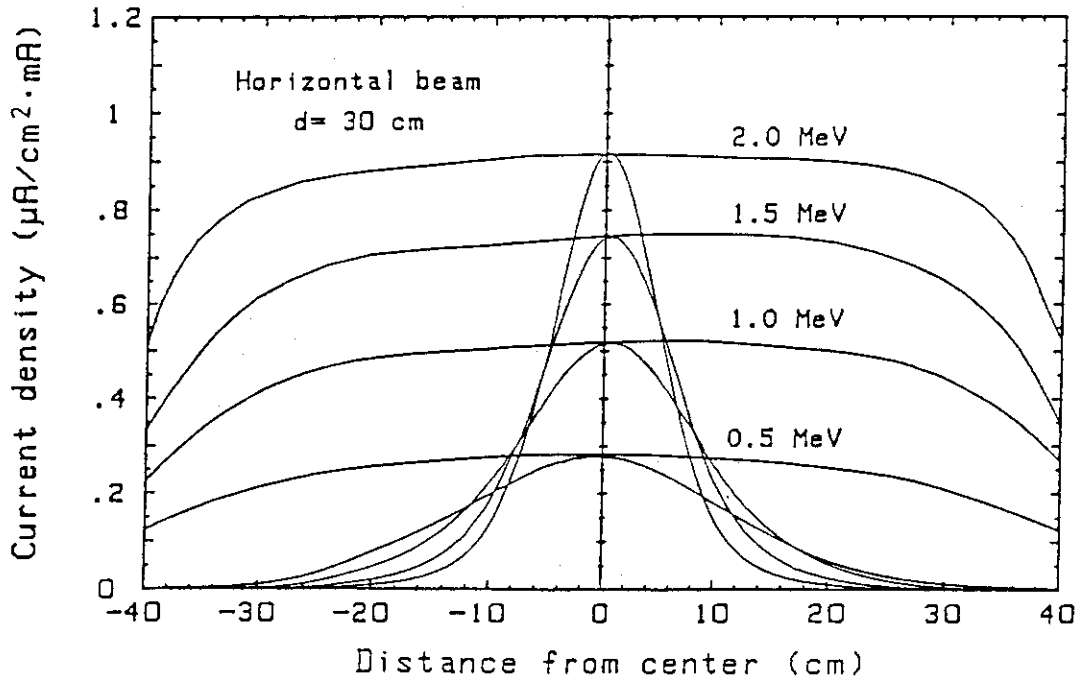


Fig. 2.1 Beam current density distributions in the X and Y directions of No.1 accelerator of JAERI Takasaki

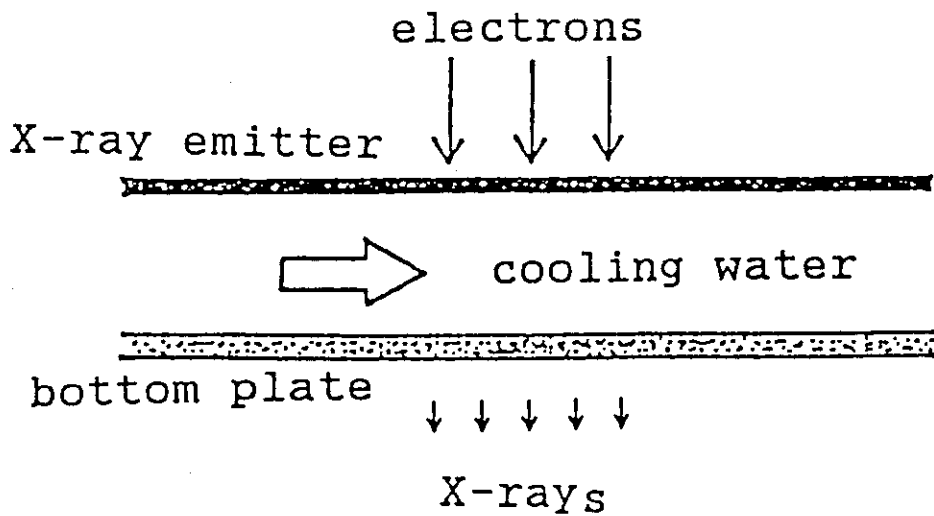


Fig. 2.2 Basic structure of X-ray generation target

3. ターゲット設計に係わる基礎データ

上記のように今回の5 MeV級の大出力X線発生用ターゲットの開発は、まず既存加速器にとりつけて実験を行うための2 MeV用ターゲットの設計から開始することになった。このためX線発生ターゲットに関する基礎データは2 MeVおよび5 MeV電子加速器用X線発生ターゲットの設計のためのデータが必要となった。また、2 MeV電子用ターゲットによる実験結果を5 MeV用ターゲットの設計に用いることが可能であるかの検討のためのデータも必要となった。

高出力X線発生ターゲットを設計するために検討した事項は次の通りである。

- 1) X線への変換効率等を考慮したターゲット物質（X線発生体）の選定，
- 2) X線発生体，冷却水，ステンレス製底板の厚さの決定，
- 3) 後方散乱電子およびX線の強度分布の確認。

1)～3)の検討のため、電子・光子モンテカルロ計算コード⁶⁾を用いて、X線発生ターゲットによる電子の散乱、吸収およびX線の発生に関する基礎データを求めた。計算条件は次の通りである。

ターゲット物質	タンタル，タングステン，金
ターゲット物質の厚さ	1 飛程（CSDA range）
入射電子のエネルギー	2，5 MeV
入射角度	0度

Table 3.1に2 MeVおよび5 MeV電子の入射角度0度の場合の電子の透過，散乱，吸収およびX線の前方と後方への発生量の計算結果を示す。Fig. 3.1および3.2にそれぞれ2 MeV，5 MeV電子が1 CSDA飛程の厚さのタンタルに入射した場合のタンタルの深さに対する電子のエネルギー堆積およびタンタルの前方に発生するX線強度の関係を示す。Fig. 3.3および3.4には入射電子エネルギーがそれぞれ2 MeVおよび5 MeVの場合の，発生するX線の強度の角度分布データを，そしてFig. 3.5に後方散乱電子強度の角度分布データを示す。またTable 3.2にタンタル（Ta），タングステン（W），金（Au）の物性値を示す。

これらのデータの検討により次の結果が得られた。

- 1) X線への変換効率はTa，W，Auの各物質においてほとんど差がない，
- 2) X線発生量が最大となるターゲット厚は0.4 飛程程度であり，この場合ターゲット部のエネルギー吸収は入射エネルギーの70%となる，
- 3) 電子の入射エネルギー2 MeVでのターゲットからの散乱電子は，5 MeVの場合の約75%（エネルギー）となることから，2 MeV電子加速器を用いた実験結果によって5 MeV加速器の場合の後方散乱の影響を推定することができる。

Table 3.1 Basic data on the interaction of 2 MeV and 5 MeV electrons with three materials (thickness:1 CSDA range), obtained by ETRAN code

INCIDENT ANGLE = 0°

ELECTRON ENERGY (MeV)	ITEMS	TARGET MATERIALS					
		Ta (Z=73)		W (Z=74)		Au (Z=79)	
		(KeV)	(%)	(KeV)	(%)	(KeV)	(%)
2.0MeV	PHOTON TRANSMISSION	49	2.43	49	2.43	48	2.42
	PHOTON REFLECTION	39	1.93	39	1.95	42	2.08
	ELECTRON TRANSMISSION	0	0.01	0	0.01	0	0.01
	ELECTRON REFLECTION	485	24.25	485	24.26	528	26.39
	ENERGY DEPOSITION	1,415	70.76	1,415	70.74	1,369	68.47
	TOTAL	1,988	99.38	1,988	99.39	1,987	99.37
5.0MeV	PHOTON TRANSMISSION	380	7.60	381	7.61	378	7.57
	PHOTON REFLECTION	177	3.54	179	3.57	191	3.81
	ELECTRON TRANSMISSION	2	0.04	2	0.03	2	0.03
	ELECTRON REFLECTION	626	12.51	645	12.89	706	14.11
	ENERGY DEPOSITION	3,800	75.99	3,748	74.96	3,691	73.81
	TOTAL	4,985	99.68	4,955	99.06	4,968	99.34

Table 3.2 Physical properties of tantalum, tungsten and gold

Items	Materials	Tantalum	Tungsten	Gold
Density (g/cm ³)		17.1	19.3	19.3
Specific heat (kcal/(kg °C))		0.033(20°C) 0.035(500°C)	0.032(20°C)	0.031(20°C)
Thermal conductivity (kcal/(m h °C))		52.8(20°C) 63.6(500°C)	170(20°C)	254(20°C)
Thermal expansion coefficient (10 ⁻⁶ /°C)		6.5(20°C) 7.1(400°C)	4.3(20°C)	14.2(20°C)
Melting point (°C)		2850	3410	1063
Workability		good	no-good	good

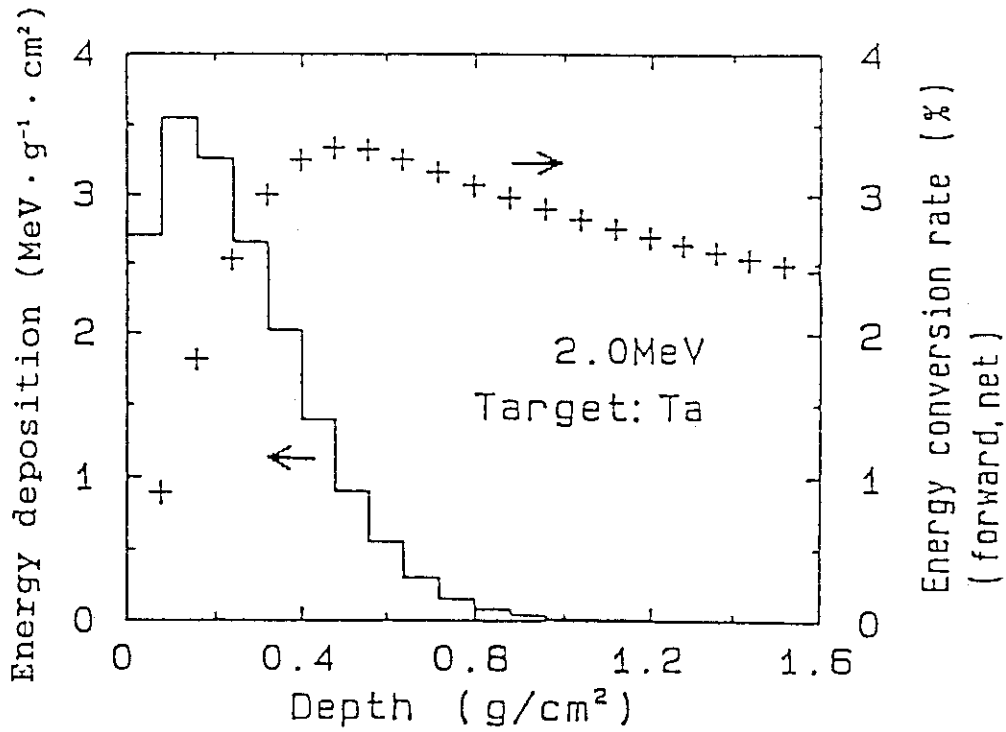


Fig. 3.1 Electron energy deposition and X-ray conversion rate emitting in the forward direction per incident electron as a function of depth in tantalum plate ($T_0=2.0$ MeV)

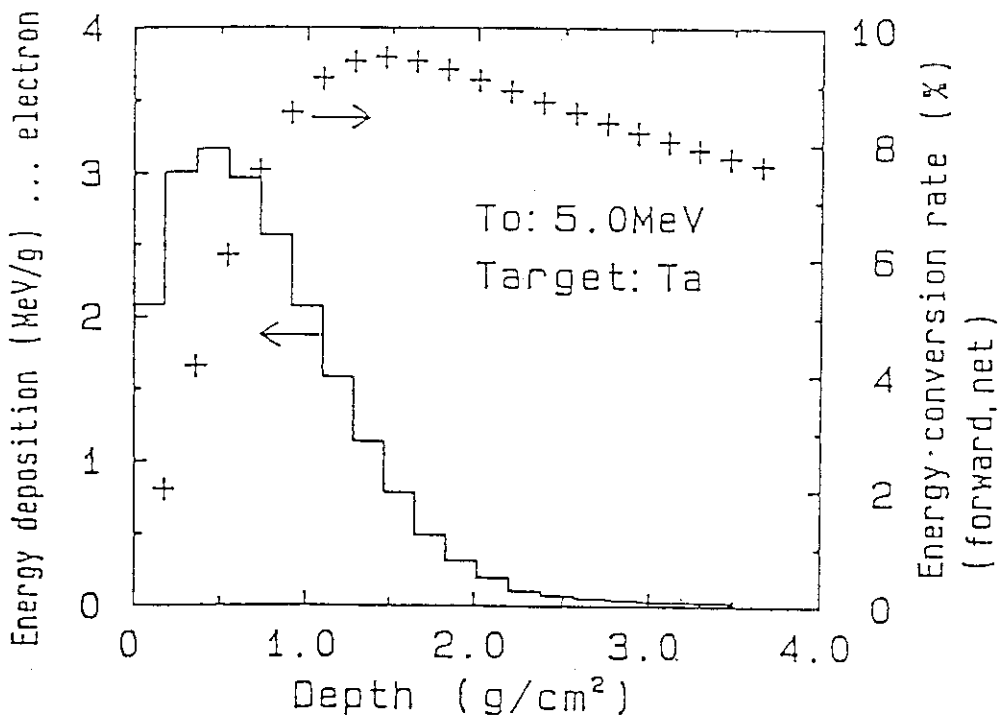


Fig. 3.2 Electron energy deposition and X-ray conversion rate emitting in the forward direction per incident electron as a function of depth in tantalum plate ($T_0=5.0$ MeV)

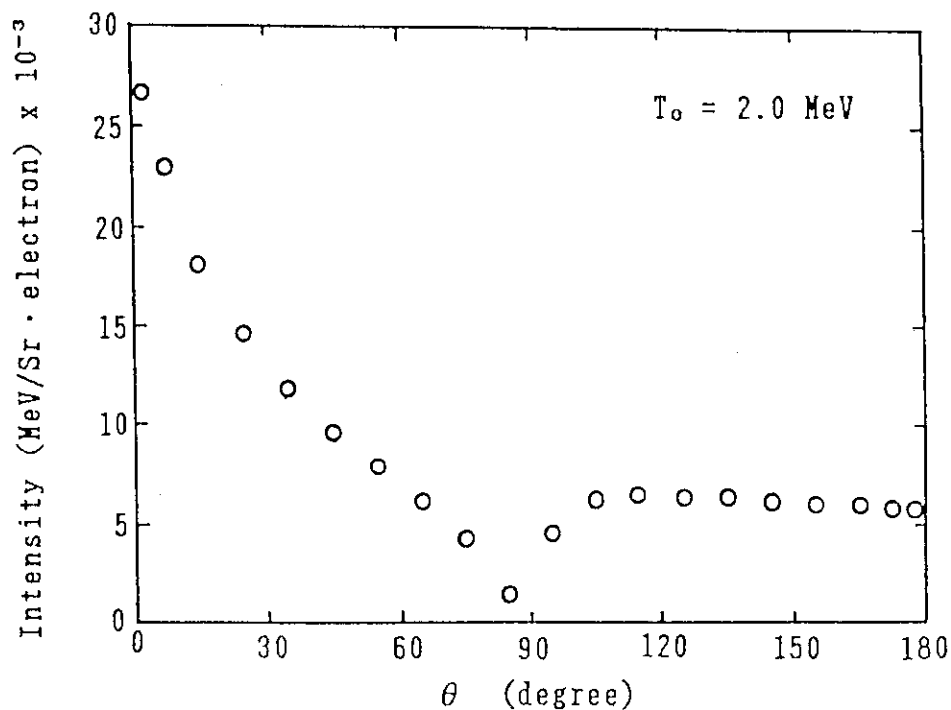


Fig. 3.3 X-ray intensity per incident 2 MeV electron incident perpendicularly on a tantalum target with thickness of one CSDA range as a function of emitting angle calculated by ETRAN code

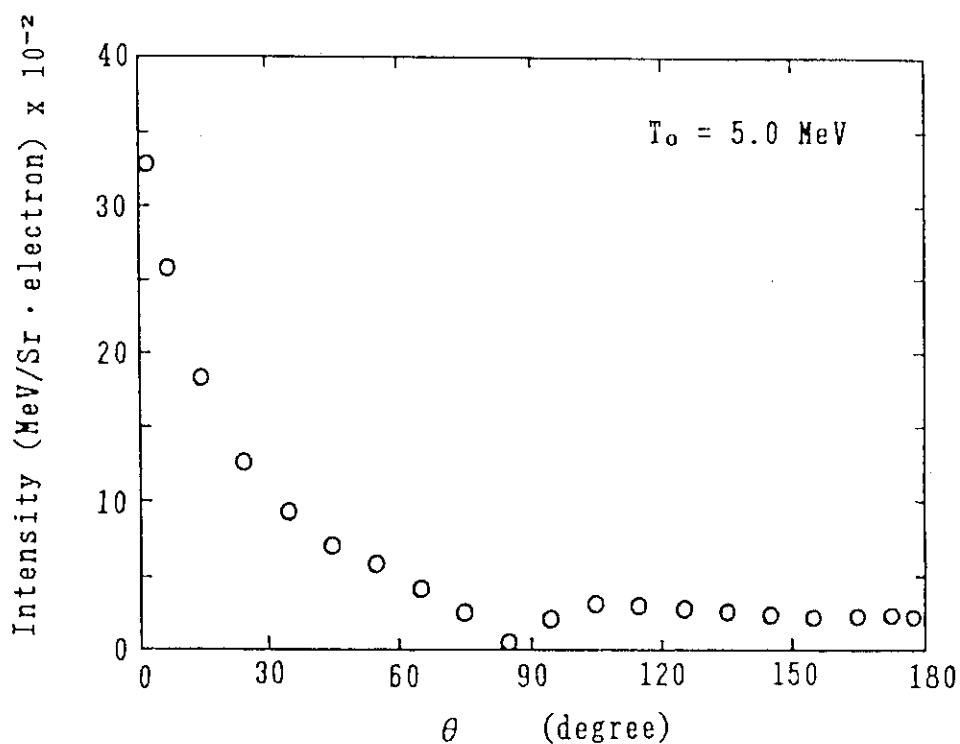


Fig. 3.4 X-ray intensity per incident 5 MeV electron incident perpendicularly on a tantalum target with thickness of one CSDA range as a function of emitting angle calculated by ETRAN code

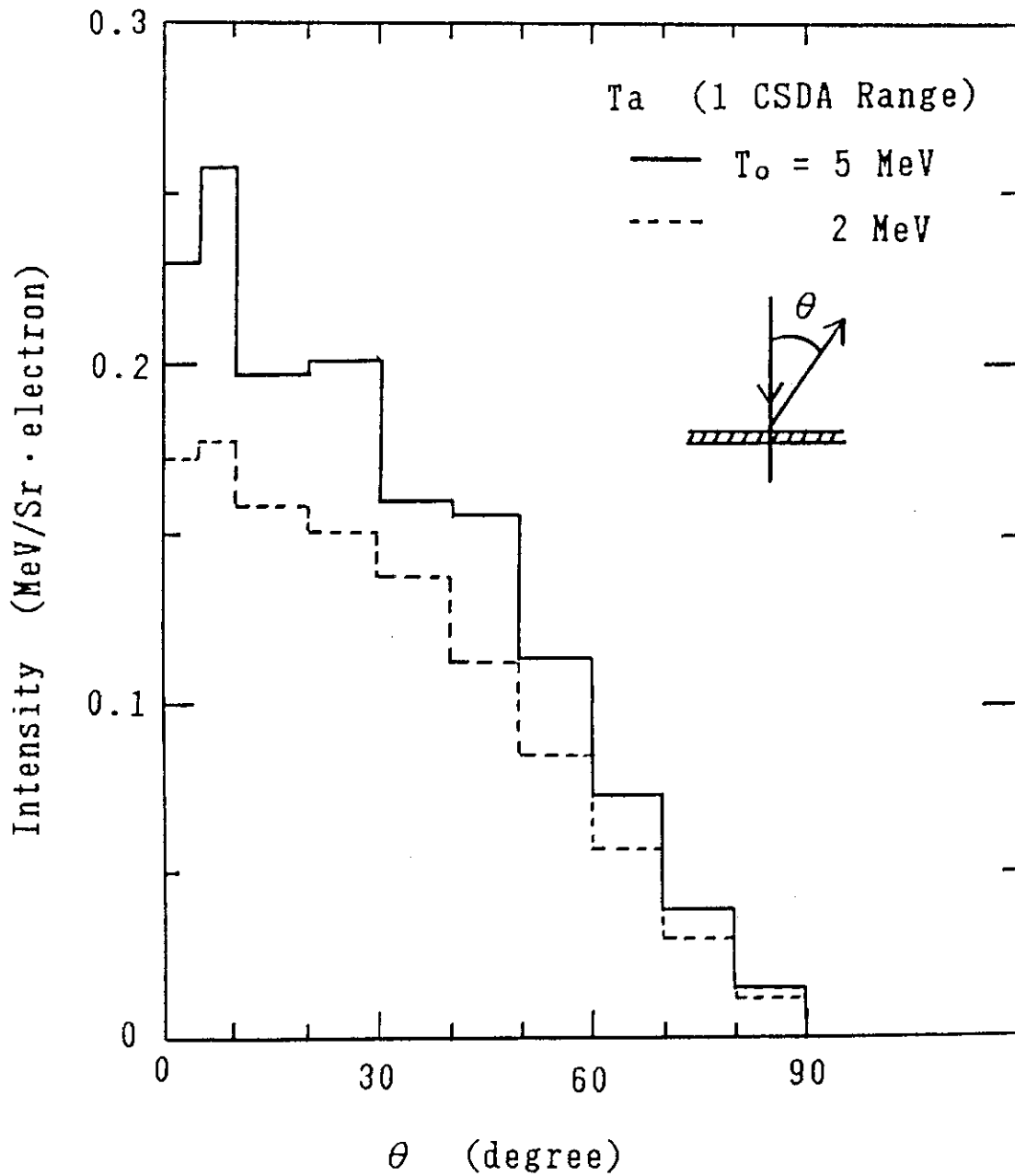


Fig. 3.5 Intensity of backscattered electrons per 2 and 5 MeV electron incident perpendicularly on a tantalum target with thickness of one CSDA range as a function of scattering angle calculated by ETRAN code

4. 実験用ターゲットの設計、試作

4.1 設計

4.1.1 設計条件

- 1) 使用する加速度は高崎研1号加速器とし、水平方向ビーム走査管に取り付けるものとする。電子エネルギー 2MeV, ビーム電流 30mA
- 2) ターゲットの取り付け位置は加速器のビーム窓から10~20cmの範囲とする。
- 3) ターゲットの構造は電子線の入射方向についてはFig. 2.2に示すものとし、入射面を長方形とする平板型を基本とする。
- 4) ターゲットのX線発生体の材質はタンタルとする。
- 5) ターゲットのサイズはFig. 2.1に示すビーム分布から、およそ30cm×100cmとする。
- 6) タンタル製X線発生体の厚さはFig. 3.2に示したX線発生量のデータより、ピーク値を与える0.3mmが最適値となるが、入手可能な0.5mmとする。また冷却水層およびステンレス底板厚はそれぞれ4mm, 1mmとする。
- 7) ターゲットへ直接与えられるエネルギーはTable 3.1に示すように加速器出力の0.71である。そしてこのターゲットへ入力した分については、Fig. 3.1のエネルギー堆積分布のデータより、X線発生体へ99%, 残り1%が冷却水へ与えられるものとする。
- 8) 入射電子の電子流密度のピーク値は実測値から、ビーム電流1mAあたり $3.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ とする。

上記の条件で設計した平板型ターゲットの概略図をFig. 4.1に示す。図に示すように冷却水はターゲット内をS字形に流れ、その流路断面は90mm×4mm(厚さ)となる。

4.1.2 ターゲット冷却設計

冷却水流路断面を幅90mm, 厚さ4mm, 冷却水温20°Cとし、冷却水流速を2.1m/secの場合を例にして熱計算をすすめた。

- 1) 冷却水とタンタル面での熱伝達
熱伝達係数hは次式で示される。

$$h = 0.023 \times (\lambda / d) \times R_e^{0.8} \times P_r^{0.4} \text{ cal/sec} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

ここで,

λ ; 水の熱伝導率 $1.6 \times 10^{-3} \text{ cal}/(\text{sec} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$ (at 80°C)

d ; 管路径 (相当直径), $d = 2 \times a / (a + 1) = 0.76 \text{ cm}$

R_e ; レイノルズ数 $R_e = d \times v / \nu$

v ; 冷却水流速 210cm/sec

ν ; 動粘性係数 $3.64 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$

P_r ; プラントル数 2.22 (at 80°C)

上記の各定数に 80°C の値を用いたのはターゲット内において冷却水の温度上昇があることを考慮したためである。

以上の結果、熱伝達係数 h は、

$$h = 0.345 \text{ cal}/(\text{sec} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

となる。

一方、ターゲットのビーム電流がピークとなる位置へ与えられる熱量 q_1 は、

$$\begin{aligned} q_1 &= E \times i \times I \times \eta_1 \times \eta_2 \times 1 / 4.2 \\ &= 2.0 \times 3.3 \times 30 \times 0.71 \times 0.99 \times 10^{-3} \times 1 / 4.2 \\ &= 0.033 \text{ (kcal/sec/cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

となる。ここで、

E : 電子のエネルギー (MeV)

i : 電子流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2/\text{mA}$)

I : ビーム電流 (mA)

η_1 : 入射電子のエネルギーのうちターゲットへ与えられる割合

η_2 : η_1 のうち X線発生体へ与えられる割合

したがって、タンタル面と冷却水との温度差 ΔT_1 は、

$$\Delta T_1 = q_1 / h = 95.7 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

となる。

2) タンタル内での熱伝導

$$q_1 = R \times (\Delta T_2 / b)$$

R : タンタルの熱伝導率, $0.13 \text{ (cal/sec} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C)}$

b : 熱伝導厚さ, 0.05 (cm)

上記より、

$$\Delta T_2 = (q_1 \times b) / R = 12.7 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

3) 冷却水へ直接与えられるエネルギーによる温度上昇

冷却水へ与えられる熱量 q_2 は、上記 η_2 が 0.01 であるので、

$$\begin{aligned} q_2 &= 2 \text{ (MeV)} \times 30 \text{ (mA)} \times 0.71 \times 0.01 \times 1 / 4.2 \\ &= 0.1 \text{ (kcal/sec)} \end{aligned}$$

冷却水量 Q は,

$$\begin{aligned} Q &= 9 \text{ (cm)} \times 0.4 \text{ (cm)} \times 210 \text{ (cm/sec)} \times 60 \text{ (sec/min)} \times 10^{-5} \text{ (}\ell/\text{cm}^3\text{)} \\ &= 46 \text{ (}\ell/\text{min)} \end{aligned}$$

したがって,

$$\Delta T_3 = q_2 / Q = 0.13 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

4) タンタルと冷却水伝達面での温度 T_1
冷却水温度を 20°C とすると,

$$T_1 = 20 + \Delta T_1 + \Delta T_3 = 115.8 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

となり, この部分では沸騰が生じることになる。

5) タンタル外面温度 T_2

$$T_2 = 20 + \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 = 128.5 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

6) 冷却水の平均温度上昇 ΔT

ターゲットへ与えられる全熱量 q_3 は,

$$\begin{aligned} q_3 &= 2 \text{ (MeV)} \times 30 \text{ (mA)} \times 0.71 \times 1 / 4.2 = 10.1 \text{ (kcal/sec)} \\ \Delta T &= q_3 / Q = 13.2 \text{ (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

4.1.3 冷却水水圧計算

1) ターゲット内管路における圧損

a) 直管部

$$\Delta P_1 = f \times r \times (v^2 / 2g) \times l / d$$

ここで,

f : 流体 (水) の摩擦抵抗, $f = 0.0056 + 0.5 / Re^{0.32} = 0.022$

r : 水の密度, $0.998 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

g : 重力加速度, $980 \text{ (cm/sec}^2\text{)}$

v : 流速, 210 (cm/sec)

d : 管路徑, 0.76 (cm)

以上より,

$$\Delta P_1 = 0.17 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

b) 曲がり部

$$\Delta P_2 = \xi \times (v^2 / 2g) \times r \times (\text{曲がり箇所})$$

ここで、

ξ : 抵抗係数, 1.265

曲がり箇所, 4箇所

以上より

$$\Delta P_2 = 0.11 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

c) ターゲット入口部

$$\Delta P_3 = \xi \times (v^2 / 2g) \times r$$

$$\xi = 0.49$$

$$v = 330 \text{ (cm/sec)} \quad (\text{入り口開口 } 0.3 \text{ cm} \times 7.8 \text{ cm})$$

以上より、

$$\Delta P_3 = 0.03 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

d) ターゲット出口部

$$\Delta P_4 = \xi \times (v^2 / 2g) \times r$$

$$\xi = 0.67$$

$$v = 330 \text{ (cm/sec)}$$

以上より、

$$\Delta P_4 = 0.04 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

したがって全圧損 P は

$$P = \Sigma \Delta P_1 = 0.35 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

となり、冷却水圧力は 0.35 (kg/cm²) 以上必要となる。

4.1.4 平板型ターゲットの強度計算

ターゲットの X線発生体であるタンタル板には冷却水の水圧が加わるため、その水圧に耐えられる十分な強度が必要である。この平板型ターゲットの冷却水路の幅は 90mm と広いため、タンタル板とステンレス製底板とを接続する補強板を取り付けることとし、その補強板は 125 mm の長さとし、ピッチは水路幅 90mm 方向には 30mm、冷却水の流れる方向には 25mm とした。

タンタル板は補強板を取り付けることにより、周辺を固定された 125 mm × 30 mm の長方形板と見なすことができる。したがって、水圧が加わった時の応力および歪みは、

$$\text{応力} \quad \sigma = 2 \times (Pb^2 / t^2) \quad (1)$$

$$\text{歪み} \quad \delta = 0.454 \times (Pb^4 / ET^3) \quad (2)$$

ここで、

P : 水圧 (kg/cm² G)

b : 短辺の長さの 1 / 2 (15mm)

t : 板厚 (0.5mm)

E : ヤング率 (19 × 10³ kg/mm²)

と表わされ、冷却水圧が上記の 0.35 kg/cm² G の場合には $\sigma = 6.3 \text{ kg/mm}^2$, $\delta = 0.03 \text{ mm}$ となる。タンタルの引っ張り強さは 82 kg/mm² であるので強度安全率 $S F = 82 / 6.3 = 13$ となり、この場合十分な強度を有する。

4.2 試作

4.2.1 平板型ターゲット

Fig. 4.2 に平板型ターゲットの外観図を示す。このターゲットはタンタル板 (X線発生体) - ステンレス (補強板) - ステンレス板 (冷却層底板) とから構成され、各部の組み立ては溶接によることにした。特に溶接が難しいと予想されたタンタルとステンレスとの溶接は真空中で行う電子ビーム溶接法を用いた。しかしこの場合、タンタル部の溶接の状態は不均一となり、タンタル-ステンレスの溶接は予想以上に難しく、実用機としてターゲットを製作する場合にこの方式の採用は問題があることがわかった。実際に冷却水を流し、電子線照射を行った特性試験の結果については後述するが、この溶接構造では十分な強度が得られないことが判明した。そこで、次に示す湾曲型ターゲットの試作を進めることにした。

4.2.2 湾曲型ターゲット

上記のように平板型ターゲットではタンタルとステンレスとの溶接が技術的に難しいことに起因する問題が生じた。そこでタンタルとステンレスとの溶接加工を避ける方式のターゲット製作の検討を進めた。その結果、その形状から湾曲型ターゲットと名づけたターゲットの試作を行うこととした。

湾曲型ターゲットは Fig. 4.3 に示すようにタンタル製 X線発生体、冷却水層、およびステンレス製底板が湾曲形になっており、金属パッキンを用いて冷却水が外へ漏れるのを防ぐ構造となっている。湾曲形とすることにより冷却水圧に対するタンタル板の応力分散が図られ、底板と X線発生体とのスペーサー (ステンレス製) と X線発生体は溶接を必要とはせず、また金属パッキンを用いているため X線発生体と底板との溶接も不要となった。なお、このターゲットの幅については 10cm とし、これは加速器のビーム窓から 10cm の位置において全ビーム電流が入射する幅とした。また、長さは 80cm とした。

このターゲットの湾曲の程度は X線発生体の部分で曲率半径 10cm とし、タンタル製 X線発

生体の厚さ，冷却水層厚，ステンレス製底板厚はそれぞれ平板形と同じ0.5mm，4mm，1mmとした。またX線発生体と底板とのスペーサーとしてFig. 4. 3に示すように4mm ϕ ×10mm（長さ）のステンレス棒を5cmピッチで3列，底板に溶接により取りつけた。電子線照射による温度上昇，冷却水による水圧などについては冷却水の流路が平板型の場合とほぼ同じ形状をしているので近似的にそのデータが適用できると考えられる。

Fig. 4. 4に試作した湾曲型ターゲットの外観図を示す。

このように湾曲型を採用することによりX線発生体に生じる応力および歪みはどのようになるか，平板の場合と比較すると次のようになる。まず，平板型に水圧が加わる場合はFig. 4. 5(a)に示す周辺固定の平板に等分布荷重が加わっている状態に対応し，湾曲型の場合は同図(b)に示すような薄肉円筒に荷重（内圧）が加わっている状態に対応する。この周辺固定の場合の最大応力 σ および最大歪み δ は上記の(1)式および(2)式で与えられ次の値となる。

$$\sigma = \alpha_2 p b^2 / t^2 = 1000 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

$$\delta = \beta_2 p b^4 / (Et^3) = 59.7 \text{ (mm)}$$

ここで p （圧力）は 5×10^{-2} (kg/mm 2)と仮定し， $\alpha_2 = 0.2$ ， $\beta_2 = 0.454$ ， $E = 19 \times 10^8$ とした。また薄肉円筒の場合の応力および歪み（半径の増加） r は次式で与えられる。

$$\sigma = p r / t \quad (3)$$

$$\delta r = p r^2 (1 - 1/(2m)) / (Et) \quad (4)$$

ここで r は半径，100 (mm)， $(1/m)$ はポアソン比，0.3を示す。計算の結果 $\sigma = 10$ (kg/mm 2)， $\delta r = 0.04$ mm となる。

上記のように湾曲型の場合には応力，歪みともに平板型に比べて明らかに小さい値となる。これは冷却水量を増大させて水圧が上がる場合の適用範囲が広い方式であることを意味する。

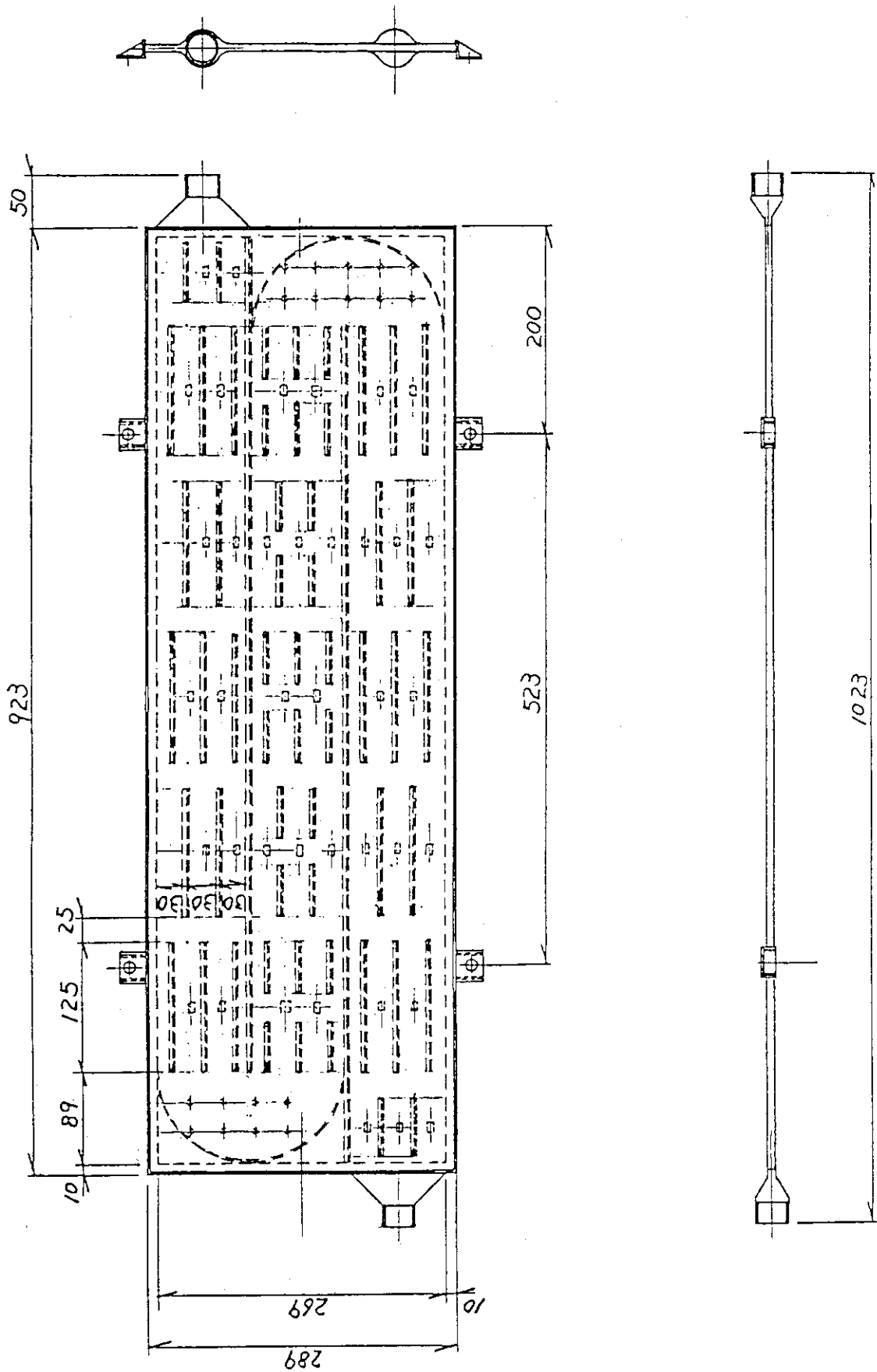


Fig. 4.1 The "plane plate type" target

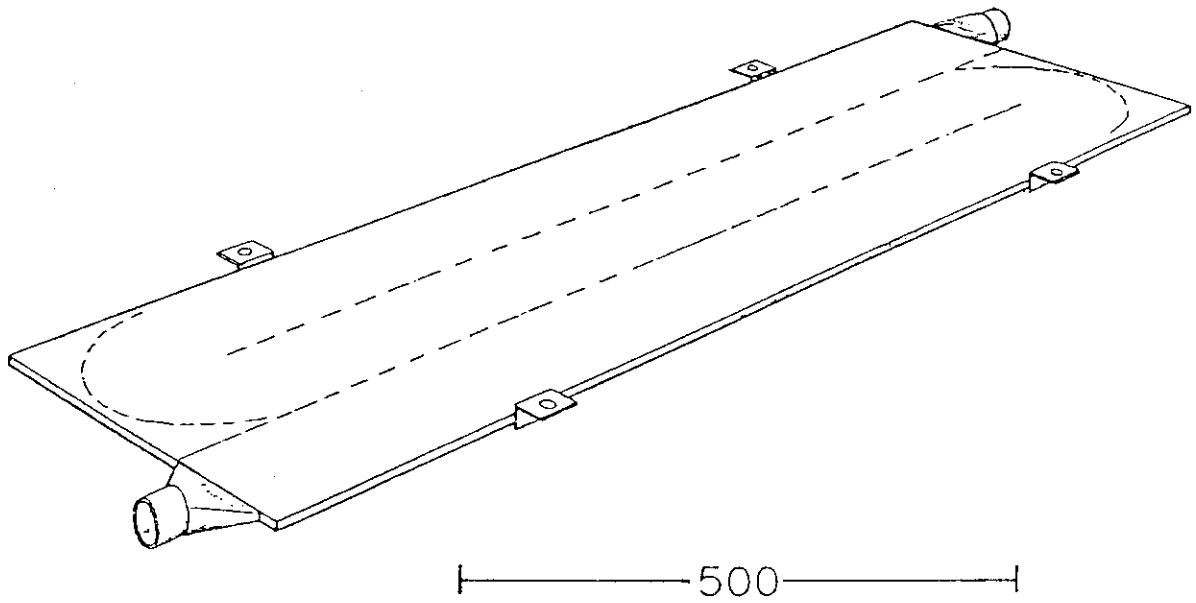


Fig. 4.2 Outside view of the "plane plate type" target

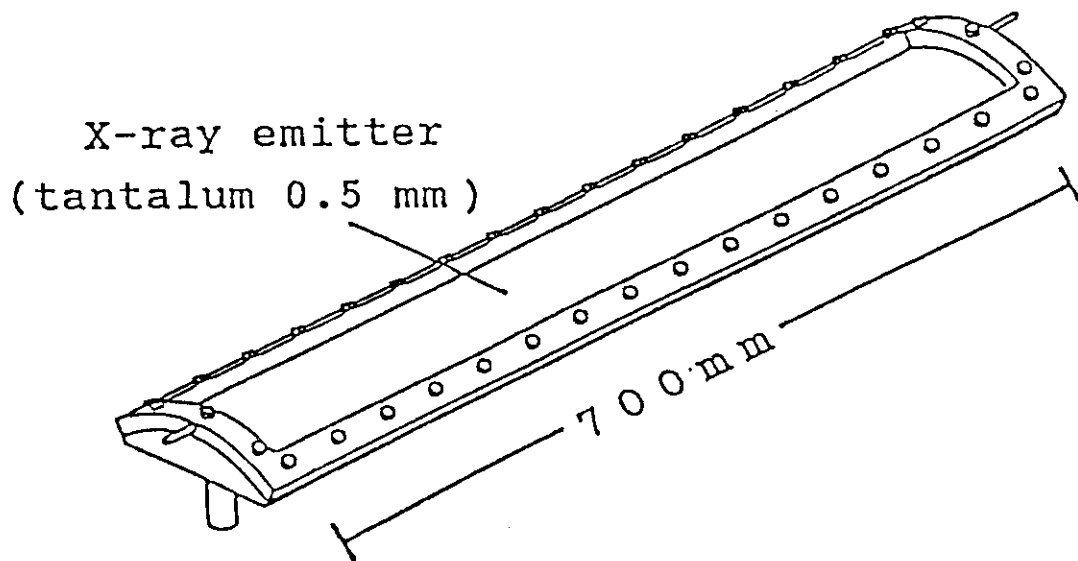


Fig. 4.4 Outside view of the "curvature type" target

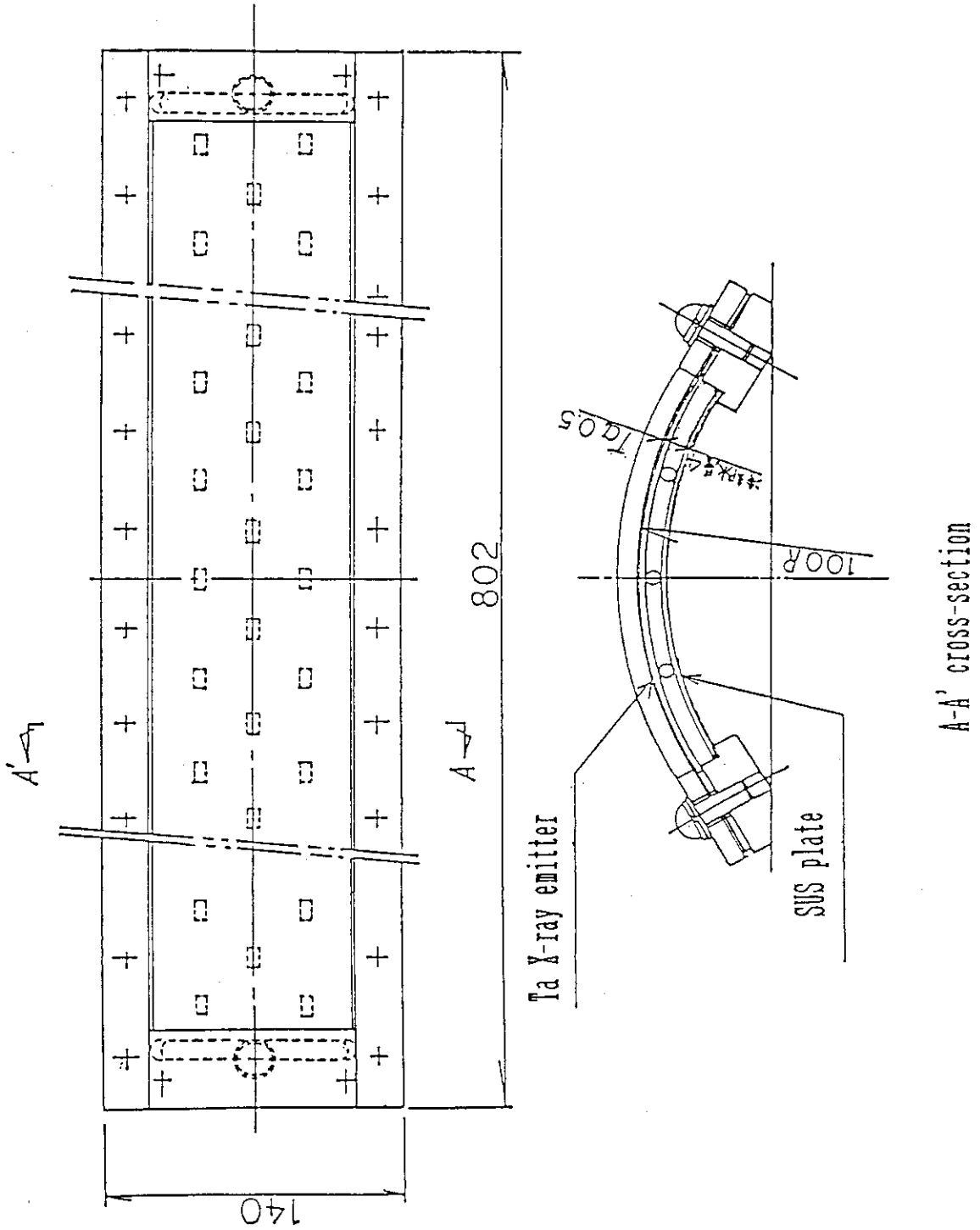


Fig. 4.3 The "curvature type" target

Plane plate Thin cylinder

(fixed perimeter, uniformly distributed load)

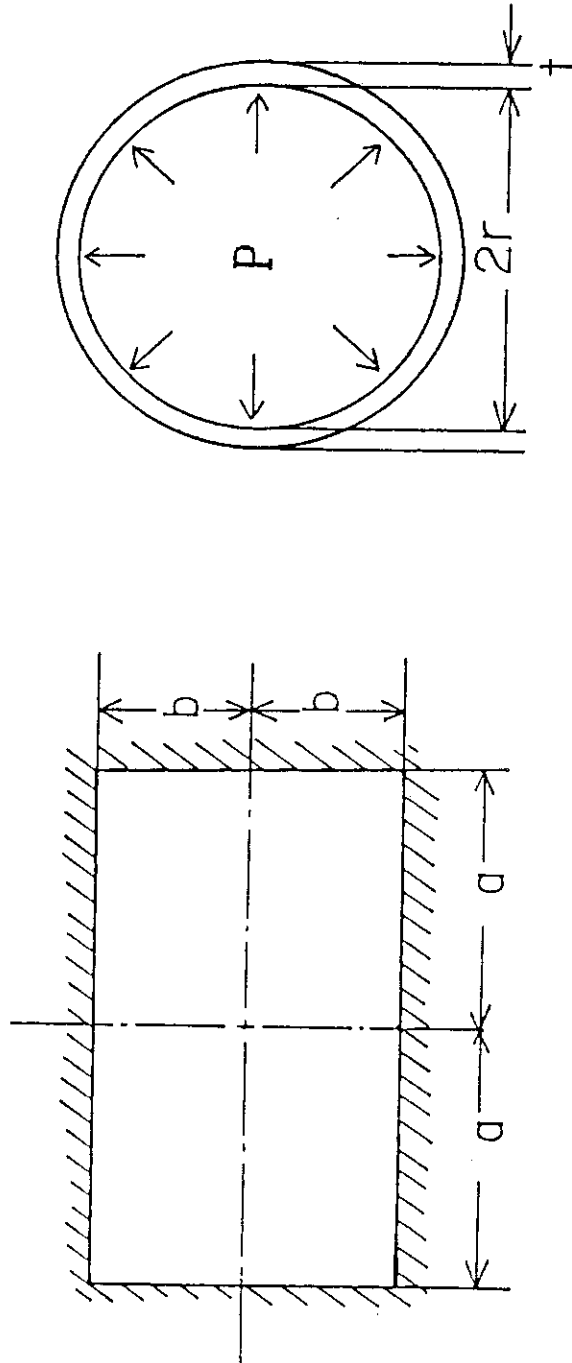


Fig. 4.5 Geometry of plane plate and thin cylinder

5. 試作したターゲットの特性試験

5.1 特性試験の目的, 概要

X線をプロセシング用として用いる場合のターゲットが備えるべき条件は、X線の発生効率が高いこととともに装置としての信頼性、耐久性に優れていることが基本となる。特性試験においては一定の設計条件に基づき製作したターゲットが所定の性能を有するかを検証することが主目的となる。そのため、実際に加速器に取り付け、冷却水を流しX線を発生させて機械的（熱的、耐水圧性）性能の確認、設計値の妥当性の評価およびスケールアップのためのデータの取得等を行うこととした。その他、発生X線の測定から線量概算法の評価、ターゲットを取り付けることによる加速器への影響についてのデータ取得などを行った。

特性試験は本研究で試作した平板型ターゲットおよび湾曲型ターゲットについて高崎研1号加速器（水平ビーム）に取りつけて行った。

5.2 結果

5.2.1 平板型ターゲット

(1) 外観, 通水テスト

ターゲットのタンタル面側からの観察において、タンタルとステンレス製補強治具との溶接が不完全になっている部分やタンタル面の歪みなどが認められた。また、通水を行った結果、わずかながら漏水が認められ、さらに溶接部の剥離が発生した。

(2) ビームテスト

ビームテストはターゲット表面が加速器のビーム窓から10cmの距離に位置するようターゲットをとりつけ、電子線出力を徐々に上昇させることにより行った。この位置における中心付近の電子流密度はビーム電流1mA当たり $3.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ となる。電子線照射中の各部の温度測定を行うため、0.1mmφのc-c熱電対を用い、これをターゲット表面および加速器のスクリーンなど数ヶ所の測定位置へ導電性樹脂材料を用いて固定した。

冷却水量についてはこれを増やすにしたがって溶接部の剥離が生じ始めたため最大18.3ℓ/minまでにとどまった。当初の計画ではビーム電流30mAまでのテストを行うことにしていたが、外観、通水試験の結果からこの平板型ターゲットについては5mAまでにとどめることにした。

5.2.2 湾曲型ターゲット

(1) 外観, 通水テスト

外観テストの結果は特に問題となる点は認められなかった。また通水テストにおいては冷却水量を最大71ℓ/minとしたが水漏れ等特に問題となる点は認められなかった。

(2) ビームテスト

加速器のビーム窓とターゲット面の間隔は平板型の場合と同じ10cmとし、冷却水量を36, 56および71ℓ/minと変化させ、各部の温度監視を続けながら2MVの加速電圧でビーム電流を増加させるビームテストを行った。温度測定は平板形の場合と同じ方法によったが、ターゲット面の1点については指示温度をアナログ記録計により記録した。これにより冷却水の沸騰の状況を観察することとした。この結果冷却水量36ℓ/minの場合にはビーム電流15mA程度の運転時から突沸と見られる現象が観察された。このため、この冷却水量ではビーム電流20mAを上限とした。56ℓ/minおよび71ℓ/minの場合には30mAまでビーム電流を増加させることができた。Fig. 5.1にターゲット面中心付近での温度とビーム電流との関係を示す。

冷却水の温度上昇は36ℓ/minの場合10°C(20mA), 56ℓ/minの場合8°C(20mA), 12°C(30mA), 71ℓ/minの場合6°C(20mA), 9°C(30mA)となった。またスキャンホーンの温度は30mA運転時で最高177°Cとなった。2MV, 30mAの定格出力での運転は冷却水量71ℓ/minで1時間続けた。この1時間のうちにターゲット各部および加速器各部の温度はほぼ飽和値に達したと判断できた。

X線線量率分布は高崎研で試作した有効電離容積約0.3mℓのX線用電離箱を用い、これを移動装置によりターゲットの長軸方向および短軸方向に移動させて測定した。Fig. 5.2に2MV, 30mAで運転した場合のターゲット前方20cmに位置における線量率分布の測定結果を示す。

また連続運転の際には加速管内における真空度の測定も行った。真空排気装置は通常の電子線照射の場合は排気速度320ℓ/secのイオンポンプを用いているが、今回はターゲットからの後方散乱電子の影響で大幅に真空度が悪化することが予想されたのでイオンポンプに加えて2000ℓ/secのクイックコンデンショナーも作動させた。その結果、ビーム電流が0mAの場合 3×10^{-8} Torrであった真空度が、ビーム電流30mAを取り出した後15分で 2.5×10^{-7} Torrとなり、最も悪化した但其の後徐々に回復し運転開始後1時間では 2×10^{-7} Torrとなった。

5.3 特性試験結果のまとめ、考察

以上の結果をまとめ、考察すると次のようになる。

- (1) 今回試作したターゲットのうち平板型については、1号加速器の定格出力で用い得る性能を有するには至らなかった。その主な原因はタンタルとステンレスの溶接が困難なことであった。今後タンタルを用いた平板型を製作する必要がある場合にはその構造について再検討を要する。
- (2) それに対し湾曲型は定格出力で十分に使用可能な性能を有することが確認できた。本方式は構造的に水圧に対して強いいため、冷却水を十分に流すことができ、大出力用ターゲットとして適した方式といえる。
- (3) タンタル面の温度について計算値と実測値との比較を試みた。計算法は4.1.2の項で述べた方法に依った。Fig. 5.3は冷却水量56ℓ/minの場合の実測値と計算結果とを示す。この結果、特に低ビーム電流域では両者が比較的良く一致することがわかる。ビーム電流が増え、温度が上がるに従い両者の差は大きくなるが、これはX線発生体と接触する部分

の冷却水が沸騰領域に達することにより熱伝達係数が大きくなることによると思われる。ここで示した計算法においてはこの沸騰域における冷却については考慮されていない。

- (4) X線の線量率 (exposure rate) 分布についての実測値と計算結果としてAPEXPコード⁷⁾による計算結果との比較を行った。この結果をFig.5.4に示す。両者は良い一致を示し、APEXPがこの計算法として有用であることがわかる。
- (5) ターゲットを装着することによる加速器への影響については、加速管内真空度、走査管部の温度上昇についての実測を含めた検討を行った。その結果既設の真空排気系、ビーム走査管の冷却では不十分であるが、ターゲット装着を前提とした設計を行うことによりこの問題の克服は可能であるという見通しが得られた。

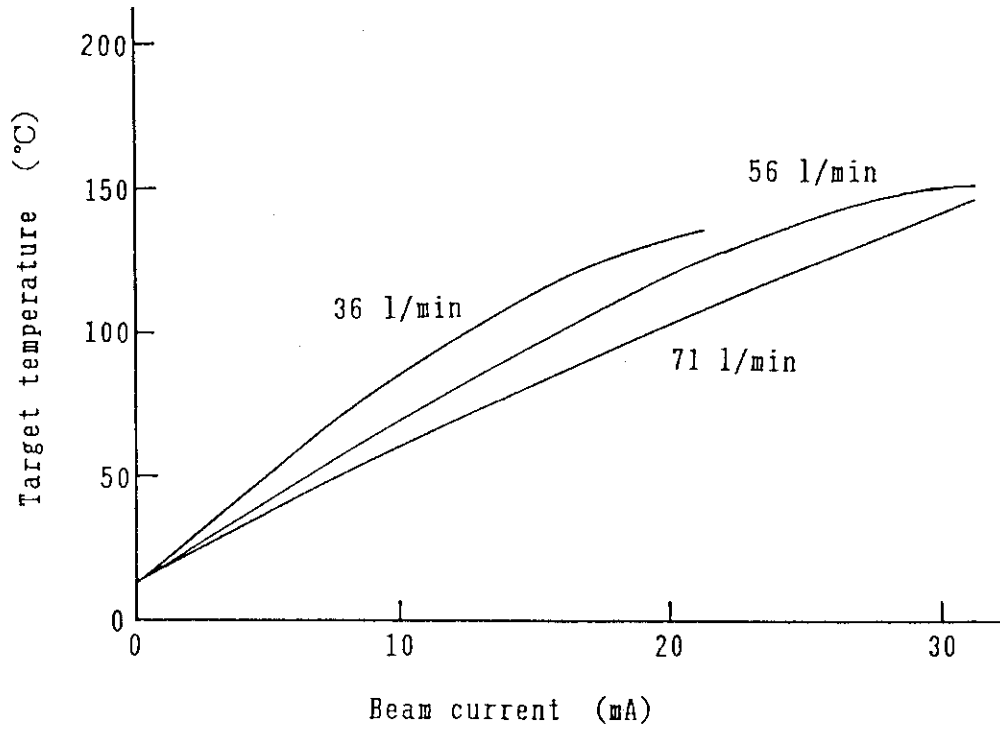


Fig. 5.1 Increase of temperature at the surface of the X-ray emitter of the curvature type target with electron beam current

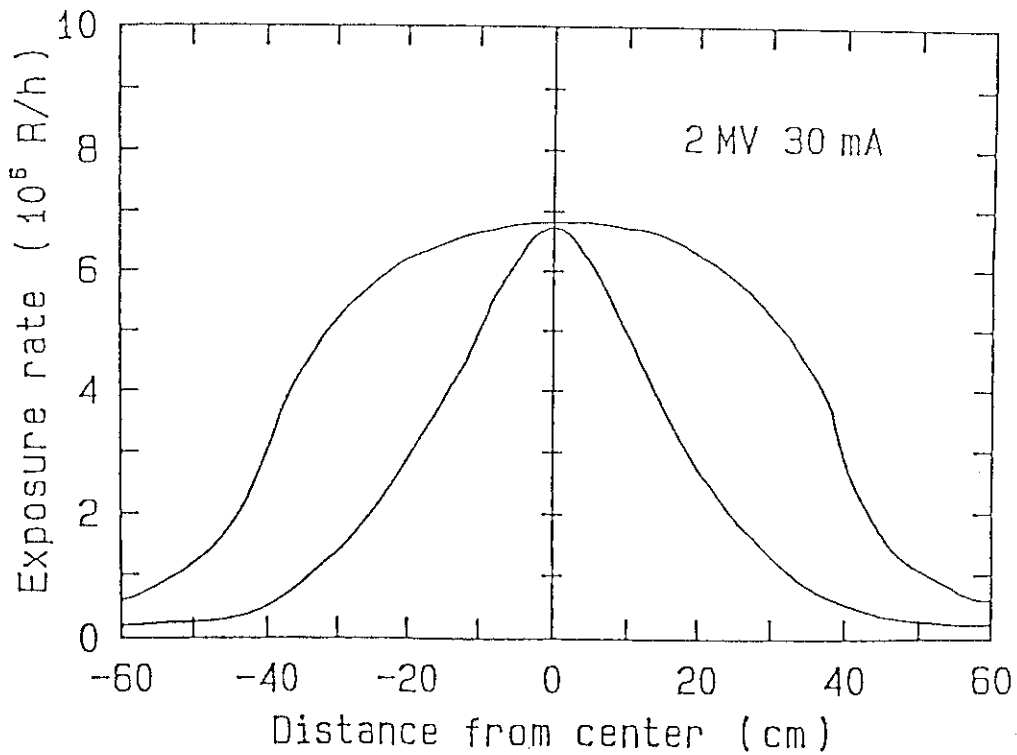


Fig. 5.2 X-ray exposure rate distributions along the X and Y directions at the accelerator operation condition of 2 MeV, 30 mA. The air gap between the target and the ion chamber is 20 cm.

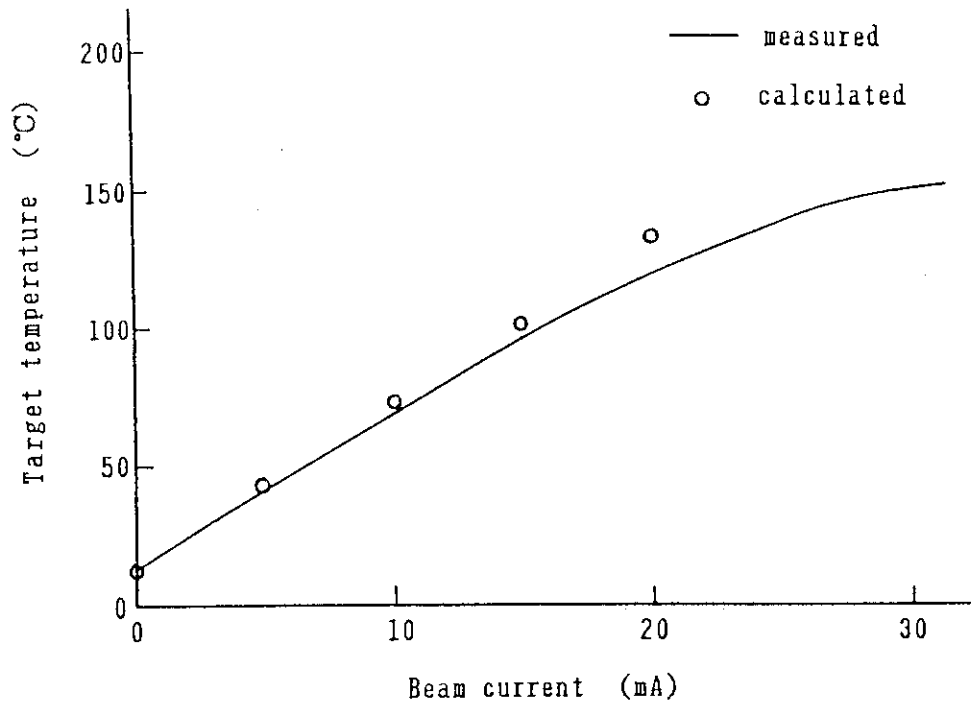


Fig. 5.3 Comparison of calculated and measured values of the temperature at the surface of the X-ray emitter as a function of beam current.

beam current density : $3.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ at 1 mA
 flow rate of cooling water : 56 l/min

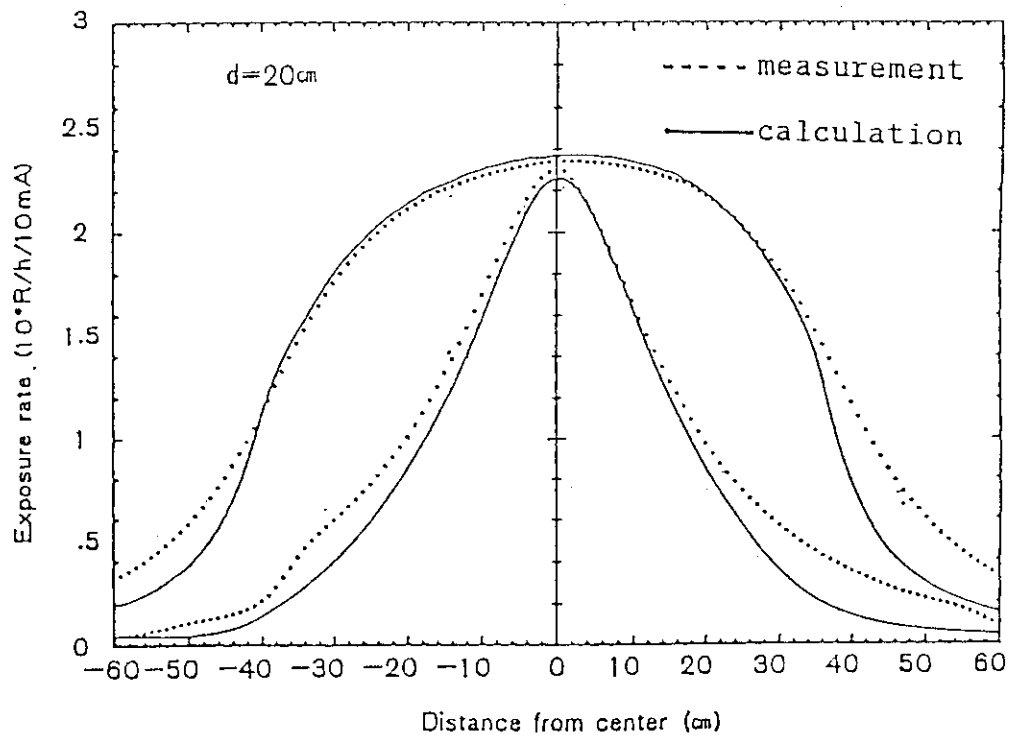


Fig. 5.4 Comparison of X-ray exposure rate distributions in the X and Y directions measured with the ionization chamber and calculated by APEXP code

6. 実用規模ターゲットの設計

6.1 ターゲットの方式

上記のように既存の 2MV, 30mA 電子加速器に取り付けるターゲットを試作し、特性試験を行った結果、湾曲型ターゲットは加速器の定格出力運転時において十分に使用可能な性能を示した。

湾曲型ターゲットは構造的に冷却水量を大きく取ることが可能であり、大出力 X 線発生用ターゲットとして適した方式であることが明らかとなった。そこで、当面は実用規模と考えている電子線出力 5MV, 60mA の電子加速器に取り付けて使用するターゲットとしての湾曲型ターゲットの設計を進めた。

6.2 設計

6.2.1 ターゲットの構造, 材質

実用規模ターゲットの材質は、試作した実験用ターゲットと同じ、X 線発生体がタンタル、底板その他はステンレスとし、冷却法は水冷式とする。各部の厚さについては Fig. 3. 2 に示す X 線発生効率や必要な機械的強度等を考慮して決定し、X 線発生体が 1mm, 冷却水層厚 8mm, 底板 1.5mm, とする。また X 線発生体の寸法は、電子線走査幅を 120 cm とすること、および電子流密度ができるだけ低くとれるよう、試作ターゲットの場合より幅を大きくすることを考慮し、長さ 130 cm, 幅 15 cm とする。X 線発生体の湾曲の程度、すなわち曲率半径は 20 cm とする。Fig. 6. 1 にこのターゲットの概略図を示す。

6.2.2 ターゲットの熱計算

上記の構成のターゲットではエネルギー 5MeV の電子線が垂直に入射した場合に、そのエネルギーの 0.763 がターゲットに与えられ、そのうちの 0.963 がタンタル製 X 線発生体に、0.064 は冷却水に与えられる。(Fig. 3. 1)

X 線発生体の表面で温度上昇が最も激しい部分は電子流密度が最大となる位置である。2MeV 電子線で実験を行った場合には、電子流密度の最大値はビーム電流 1mA 当たり $3.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、すなわち定格出力である 30mA では $99 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ であった。本ターゲットの場合にはビーム走査幅が 120cm の加速器で用いるので、単位ビーム電流当たりの電子流密度は近似的に走査幅 60cm の場合の $1/2$ と考えることができる。したがって、走査幅 120cm の場合のビーム電流 60mA と 60cm の場合の 30mA とでは電子流密度は等価と考えられる。

本ターゲットについて、ビーム電流 1mA 当たりの電子流密度および冷却水量がそれぞれ $1.65 \mu\text{A}/\text{cm}^2 - 400 \ell/\text{min}$, $1.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2 - 400 \ell/\text{min}$, および $0.65 \mu\text{A}/\text{cm}^2 - 200 \ell/\text{min}$ の場合について、ビーム電流とタンタル表面の温度との関係を 4. 1. 2 で述べた方法により計算

した結果を Fig. 6.2 に示す。同図には比較のため、2MeV 電子線による実験で安定に動作することを確認したビーム電流 1mA 当たりの電子流密度 $3.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、冷却水量 $57 \ell/\text{min}$ の場合の計算結果も示す。この結果、5MeV でビーム電流 1mA 当たり $1.65 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の電子流密度で、冷却水量 $400 \ell/\text{min}$ の場合には 2MeV 電子線で実験を行った場合より温度上昇は激しくなるが、 $1.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2 - 400 \ell/\text{min}$ および $0.65 \mu\text{A}/\text{cm}^2 - 200 \ell/\text{min}$ の場合にはそれ以下となる。したがって、この条件で、ターゲットはビーム電流 60mA までの運転に使用できる見通しが得られた。

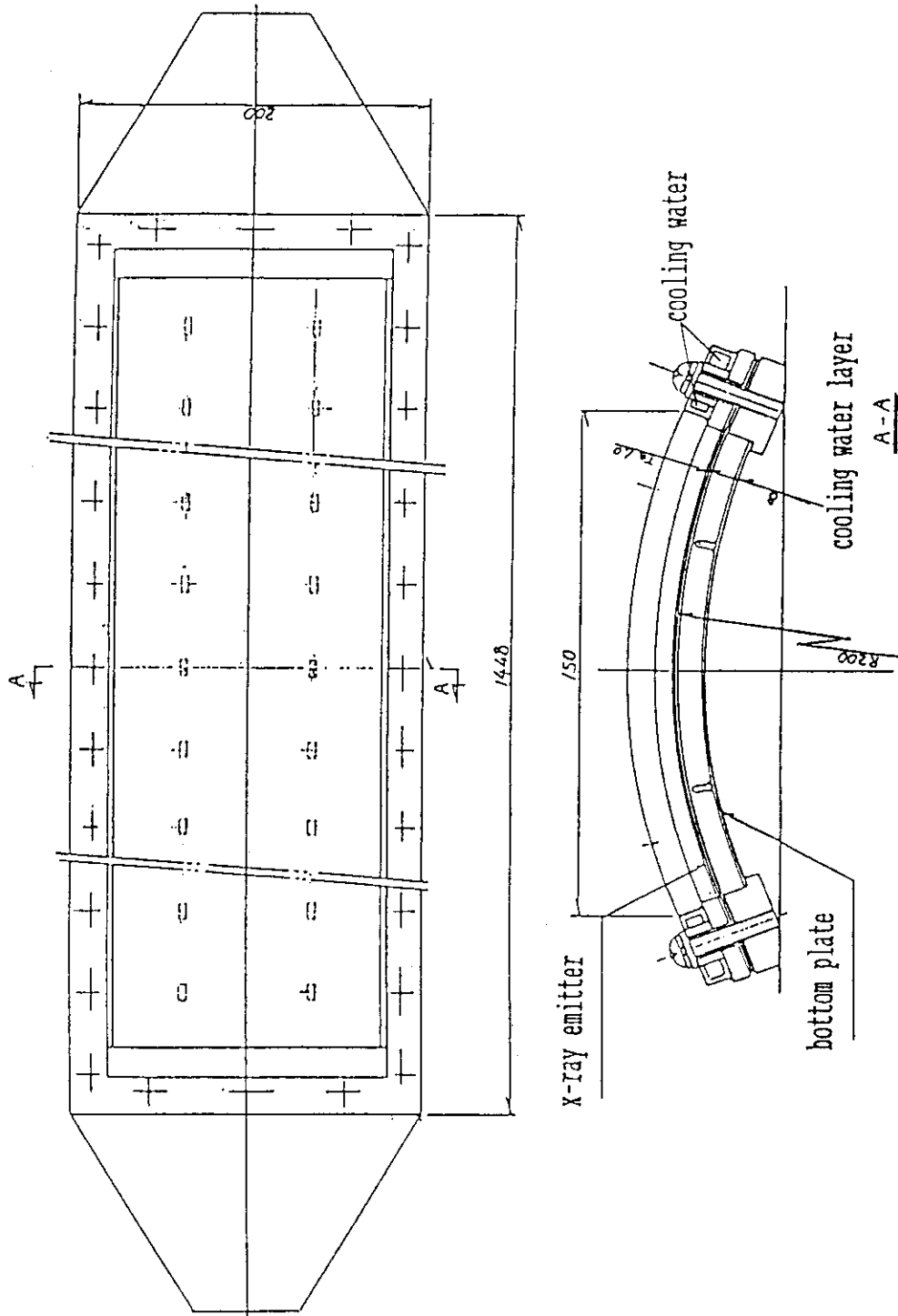


Fig. 6.1 The "curvature type" X-ray generation target for industrial use

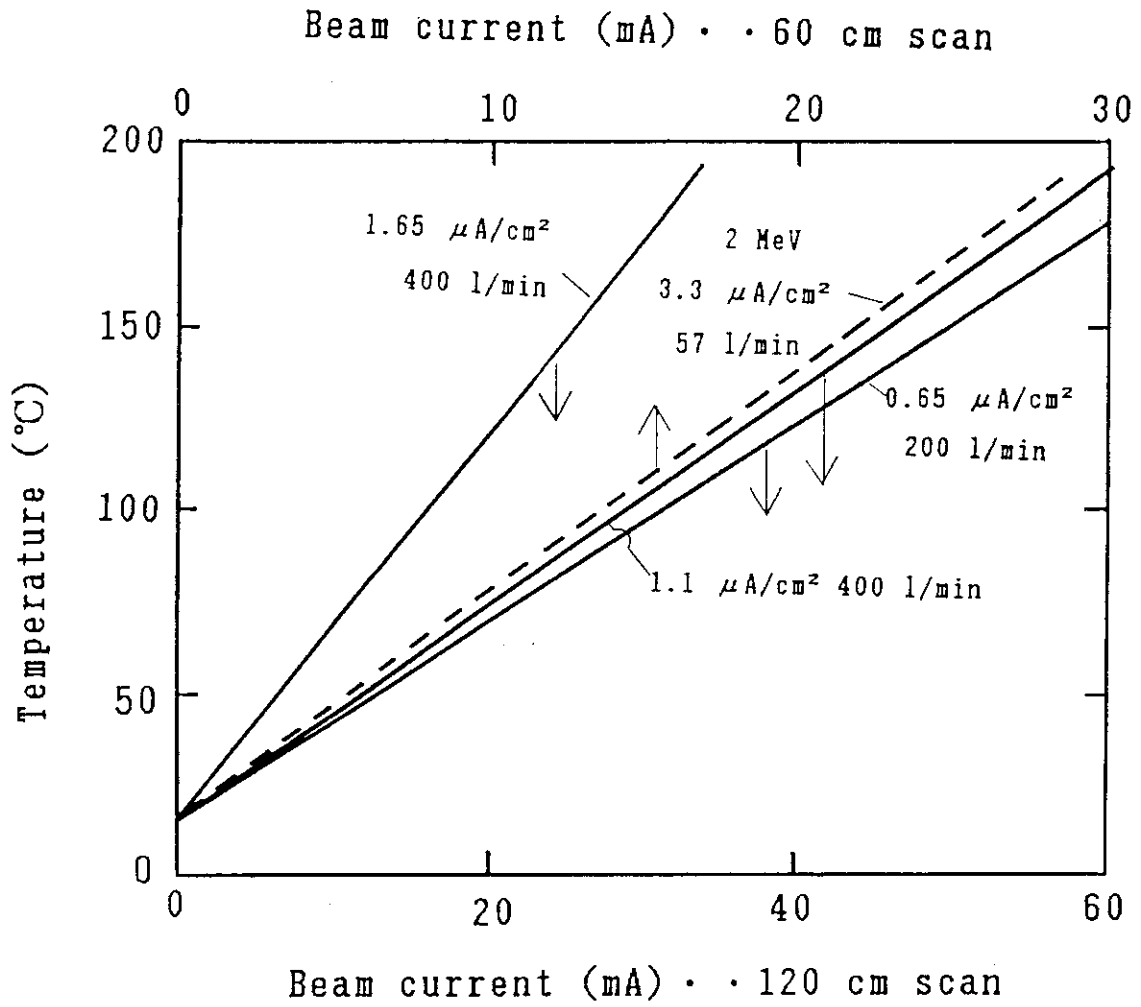


Fig. 6.2 Calculated result of temperature at the surface of the X-ray emitter for different current densities and flow rates of cooling water as a function of beam current

7. ま と め

本研究の結果をまとめると次のようになる。

- 1) 電子加速器をプロセシング用 X 線源として用いることの有効性を確認し、これが、最近の加速器の性能向上からみて十分に実用可能と考えた。
- 2) 実用化するための電子加速器としては加速電圧 5 MV、出力 300kW のコッククロフト型を想定した。
- 3) ETRANコードによる基礎データを基に適切な X 線発生体の材質や厚さなどを決定した。
- 4) 既存の 2MV, 30mA 電子加速器に取り付けてデータ取得を行うための実験用ターゲットとしてタンタルを X 線発生体とする、“平板型”および“湾曲型”の水冷式ターゲットを試作した。
- 5) “平板型”の製作に用いたタンタルの溶接加工は技術的に難しく、この方法はターゲットの製作においては用いるべきでない。
- 6) 湾曲型ターゲットは構造的に内部からの水圧に対して強く、多量の冷却水を流すことができるので大出力用ターゲットとして適した方式である。
- 7) 実験用ターゲットを用いた実験において、X 線発生体の温度上昇の計算値と実測値の比較を行った結果、冷却水の沸騰域より低い温度範囲では比較的良く一致することを確認した。
- 8) 5 MV 用実用規模ターゲットの設計には上記実験結果を参考にし、適切な電子流密度と所要冷却水量を求めた。

8. あ と が き

電子加速器の性能向上は目覚ましく、本研究を進めている間にも加速電圧5 MVのプロセッシング用大出力加速器の製作が現実に進められている状況である。高電圧大出力加速器は電子線源として利用し、今まで不可能であった厚い物質の照射処理のために期待されていることは勿論であるが、X線源としての利用についても大いに関心が払われ、その実用化を図るための技術的な検討が進められているようである。

本研究はターゲットを製作するために必要な基礎データの取得に始まり、ターゲットの試作、実証試験、温度上昇の測定と計算との比較、そして実用ターゲットの設計へとステップを追って進めた^{8,9)}。本研究で得られた基礎データや技術的蓄積が、このX線源の開発に役立ち、その実用化が一日もはやく行われることを期待したい。

我々は更に、この実用化において適切な照射方法の検討、コスト計算、実用規模施設の設計などへと研究を進めた。これらについては別に報告する予定である。

おわりに、本研究の遂行にあたり御指導を賜った日本原子力研究所ラジオアイソトープ・原子炉所長田村直幸氏に感謝の意を表する。

引 用 文 献

- 1) Radiat. Phys. Chem., 25, No 1~6 (1984)
- 2) 永倉邦男：“医療用具の放射線滅菌施設の現状と問題点”，放射線と産業，No.38 p 16，放射線照射振興協会（1987）
- 3) 須永博美，上松 敬，田中 進，田中隆一：“照射用電子加速器によるX線照射法の検討”，第20回理工学における同位元素研究発表要旨集，p 144，（1983）
- 4) 金沢孝夫，春山保幸，宇野定則 他：JAERI-M，86-005，“高崎研1号加速器（デュアルビーム型，2MeV，60kW）の電子線出力特性”，日本原子力研究所，（1986）
- 5) Farrell J. P., Seltzer S. M. and Silverman J. : Radiat. Phys. Chem., 22, 469, (1983)
- 6) Berger M. J. and Seltzer S. M. : "Electron and photon transport program, II, Note on program ETRAN 15", NBS Report 9837 (1968)
- 7) 田中 進，上松 敬，須永博美，田中隆一：“工業照射用X線の線量計算コード”，第22回理工学における同位元素研究発表会要旨集，p 48，（1985）

8. あとがき

電子加速器の性能向上は目覚ましく、本研究を進めている間にも加速電圧5 MVのプロセッシング用大出力加速器の製作が現実に進められている状況である。高電圧大出力加速器は電子線源として利用し、今まで不可能であった厚い物質の照射処理のために期待されていることは勿論であるが、X線源としての利用についても大いに関心が払われ、その実用化を図るための技術的な検討が進められているようである。

本研究はターゲットを製作するために必要な基礎データの取得に始まり、ターゲットの試作、実証試験、温度上昇の測定と計算との比較、そして実用ターゲットの設計へとステップを追って進めた^{8,9)}。本研究で得られた基礎データや技術的蓄積が、このX線源の開発に役立ち、その実用化が一日もはやく行われることを期待したい。

我々は更に、この実用化において適切な照射方法の検討、コスト計算、実用規模施設の設計などへと研究を進めた。これらについては別に報告する予定である。

おわりに、本研究の遂行にあたり御指導を賜った日本原子力研究所ラジオアイソトープ・原子炉所長田村直幸氏に感謝の意を表する。

引用文献

- 1) Radiat. Phys. Chem., 25, No. 1~6 (1984)
- 2) 永倉邦男：“医療用具の放射線滅菌施設の現状と問題点”，放射線と産業，No.38 p.16，放射線照射振興協会（1987）
- 3) 須永博美，上松 敬，田中 進，田中隆一：“照射用電子加速器によるX線照射法の検討”，第20回理工学における同位元素研究発表要旨集，p.144，（1983）
- 4) 金沢孝夫，春山保幸，宇野定則 他：JAERI-M，86-005，“高崎研1号加速器（デュアルビーム型，2MeV，60kW）の電子線出力特性”，日本原子力研究所，（1986）
- 5) Farrell J. P., Seltzer S. M. and Silverman J. : Radiat. Phys. Chem., 22, 469, (1983)
- 6) Berger M. J. and Seltzer S. M. : "Electron and photon transport program, II, Note on program ETRAN 15", NBS Report 9837 (1968)
- 7) 田中 進，上松 敬，須永博美，田中隆一：“工業照射用X線の線量計算コード”，第22回理工学における同位元素研究発表会要旨集，p.48，（1985）

- 8) Sunaga H., Tanaka S., Tanaka R. and Taniguchi S. : " Study of High Power X-ray Source for Radiation Processing ", Proceed. 3rd. Japan-China Joint Symp. on Accelerators for Nucl. Sci. and Their applications, Saitama, Japan (1987)
- 9) Yotsumoto K., Sunaga H., Tanaka S. et al. : " High Power Bremsstrahlung X-ray Source for Radiation Processing ", Radiat. Phys. Chem. 31, pp 363-368 (1988)