

NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE

大出力マイクロ波源の開発に関する調査研究

小 野 昭 一

(1992年4月6日受理)

NIFS-MEMO-6

1992年4月

RESEARCH REPORT NIFS-MEMO Series

This report was prepared as a preprint of work performed as a collaboration research of the National Institute for Fusion Science (NIFS) of Japan. This document is intended for information only and for future publication in a journal after some rearrangements of its contents.

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to the Research Information Center, National Institute for Fusion Science, Nagoya 464-01, Japan.

NAGOYA, JAPAN

平成3年度核融合科学研究所
支援調査共同研究報告書

大出力マイクロ波源の開発に関する調査研究

平成4年3月

研究代表者 小野昭一
(東北大学 電気通信研究所)

Development of High Power Microwave Source

S. Ono

Research Institute of Electrical Communication
Tohoku University, Katahira 2-1-1, Sendai, 980, Japan

ABSTRACT

To achieve thermonuclear fusion it is inevitable to develop high power microwave and millimeter wave sources for plasma heating. In 1990, working group was organized as a collaboration study in National Institute for Fusion Science to review the present status of development on high power microwave source. We report the review of development on high power klystron and gyrotron, FEL and microwave power source by REB. Development of high power klystron is almost finished except for cooling of the window, cavity and collector. As for the gyrotron oscillating with the whispering gallery mode one must overcome the same problem for CW operation. In the quasi-optical gyrotron, there is no special progress for increasing the frequency and efficiency. Though the experimental evidence on autoresonance in the development of peniotron is performed, output power and frequency is much smaller than that of the gyrotron. It is difficult to increase in the pulse width of FEL having giant power of GW level with several tens ns and the utilization for plasma heating is limited.

In addition, we summarize microwave and millimeter wave oscillators with high power which are running in the laboratories and the institutes.

Keywords: klystron, gyrotron, peniotron, FEL, REB, microwave, millimeter wave, plasma heating

目次

I. はしがき

1. 研究組織	2
2. 研究期間及び研究会開催日程	2

II. 調査内容

1. 調査研究総論	3
2. 核融合プラズマ研究における大出力マイクロ波源の 利用状況と利用計画	5
3. 大出力マイクロ波源の開発状況と展望	25
3.1 ジャイロトロン	25
3.2 自由電子レーザ	27
3.3 クライストロン	29
3.4 REBを用いたマイクロ波源	32

I. はしがき

1. 研究組織

研究代表者： 小野 昭一 （東北大学電気通信研究所 教授）
研究協力者： 増崎 克 （金沢大学理学部 教授）
大久保邦三 （核融合科学研究所 教授）
曄道 恭 （京都大学理学部 助教授）
斎藤 宏文 （宇宙科学研究所 助教授）
佐藤 元泰 （核融合科学研究所 助教授）
横尾 邦義 （東北大学電気通信研究所 助教授）
際本 泰士 （筑波大学プラズマ研究センター 助教授）
畠山 力三 （東北大学工学部 助教授）
鎌田 啓一 （金沢大学理学部 助教授）
安藤 利得 （金沢大学理学部 助手）

2. 研究期間及び研究会開催日程

研究期間： 自 平成3年4月1日
至 平成4年3月31日

研究会開催日程： 第1回研究会 平成3年7月3日
核融合科学研究所新館4階会議室
第2回研究会 平成3年11月13日
東北大学電気通信研究所中会議室
第3回研究会 平成4年1月24日
核融合科学研究所新館4階会議室

II. 調査内容

1. 調査研究総論

本調査共同研究では、昨年度に引き続き本年度も、プラズマの加熱、計測等、熱核融合達成のためには不可欠な研究分野であるマイクロ波、ミリ波帯大電力電磁波源、具体的には、クライストロン、ジャイロトロン、自由電子レーザ等、種々の大電力電子管の開発状況、及び、国内外諸研究機関におけるそれらの利用状況と将来の利用計画とについて調査を行った。現状では製品化は勿論、研究開発段階としても上記の諸大電力電子管ほどには至っていないため、昨年度は採り上げなかった種々の電子管についても、マイクロ波大電力源としての可能性、また、上記の諸大電力電子管に対する原理的な優劣を知る目的で調査した。

調査方法としては、昨年度と同じく、各共同研究者がそれぞれ担当項目についての調査を行い、3回開催した研究会において、それらの結果を報告し合い、討議、検討を行っている。大電力マイクロ波源の利用状況と将来利用計画に関しては、主として核融合プラズマ研究に関わる国内諸研究機関へのアンケート調査を行いまとめた。本報告書はこれらの調査研究の結果を取り纏めたものである。各調査項目についての執筆者は下記の通りである。

2. 核融合プラズマ研究における大出力マイクロ波源の

利用状況と利用計画	大久保 邦三 畔道 恭 際本 泰士 畠山 力三
-----------	----------------------------------

3. 大出力マイクロ波源の開発状況と展望

3.1 ジャイロトロン	佐藤 元泰
3.2 自由電子レーザ	斎藤 宏文
3.3 クライストロン	横尾 邦義
3.4 REBを用いたマイクロ波源	増崎 克 鎌田 啓一 安藤 利得

合計2年度に亘った本調査研究を総括し、マイクロ波、ミリ波帯大電力電磁波源について強いて結論的な事項を列挙すれば以下になるよう。

a) 核融合プラズマの低域混成波加熱(LHH)用大電力クライストロンについては、長い開発研究の歴史を持ち、大出力化に伴う全ての電子管に共通な真空窓や、共振器とコレクターの冷却に関する問題を除けば、学問的にも技術的にもほぼ完成の域にあるものと判断される。

b) 電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)用電磁波源については、周波数帯域140～280 GHzで連続波、或は、長パルス(パルス幅数秒)出力1 MW以上のものの開発が要求されているが、出力の点では、ジャイロトロンで高次の $TE_{0,nl}$ ($n>10$)ホイスパーリングギャラリー・モード開放型空洞共振器を用いることにより、達成できる見通しが得られているが、長パルス化に関しては上記クライストロンの場合と同じ問題を残している。高周波数化、高出力化に関しては、空洞共振器型より有利であるとの観点から準光学的ジャイロトロンの開発研究が進められてきたが未だ特筆すべき成果はなく、今後一層の理論的、実験的研究が望まれる。

ベニオトロンについては、その特長とする高効率性、又、より効率増大の可能性を持つ自己共鳴型動作の実験的確認はなされているが、何れも10 GHz帯の小出力動作におけるもので、現状では、周波数、出力、共にジャイロトロンの結果と比較できるものではない。

自由電子レーザの開発研究に関しては、ローレンス・リバモア研究所の装置に代表される誘導加速器を使用した大型装置によるものと、クライストロンやジャイロトロン程度、即ち、電子管程度に小型化しようとする二つの流れがある。前者では、既にGWを越えるパルス出力も得られているが、パルス幅は数10nsであり誘導加速器を使用する以上パルス幅の伸長は難しい。従って、これをECRHに使用するとすれば、非線形現象を含めプラズマ加熱そのものが大きな研究対象になろう。この装置自身については、安定で長寿命の陰極の開発とより高効率化を図る事が必要である。後者に関しては種々の提案がでている段階で、実験の結果は少なく今後に期待したい。

尚、昨年度の調査報告書に記したことであるが、現在、その感を更に深くしている事を以下に再記しておく。

「本調査研究を通じ改めて痛感させられたのは、我が国におけるこの分野の研究開発体制の不備とその基盤が如何に弱いものであるか、と云う事である。この事は、本報告書を読まれる方々には直ちに御理解頂けることと思うが、技術先進国、経済大国と自他共に認める我が国としては残念でならない。開発研究に直接携わっている我々の一層の努力が必要なことは勿論であるが、関係各位の強力な御支援をもお願いしたい。」

最後に、今年度の調査で行ったアンケートに御回答頂いた方々の御氏名を列記し、感謝申し上げます。

久保 伸(核融合研)、関子 秀樹、長崎 百伸(京大・ヘリオトロン)、今井 剛、星野 克道(原研)、中村 幸男(九大・応力研)、渡辺 博茂(東北大・工)、佐藤 徳芳、飯塚 哲(東北大・工)、中川 行人(日電アネルバ)、河合 良信(九大・総理工)、三宅 正司(阪大・溶接研)(敬称略、順不同)

2. 核融合プラズマ研究における大出力マイクロ波の利用状況と利用計画

大出力マイクロ波源に関する本調査研究を実施するにあたって国外、国内でミリ波およびマイクロ波が如何なる核融合実験装置でどのように利用されているかを認識することは今後の発振管の開発にとってのみならず各種の技術情報の情報交換による相互の技術レベル向上に寄与すると考えられる。この主旨から国内の核融合・プラズマ実験装置を設置している機関に高周波源、伝送系、入射系、将来計画、参考文献について調査依頼をした。この回答が以下の資料1-13に掲載されている。この資料から電子管についての抄録を作成した。改めて回答を頂いた関係機関各位に感謝を致します。

表2. 1 国内の核融合・プラズマ実験装置でのマイクロ波、ミリ波の利用状況

周波数 GHz	電力 kW	パルス 幅 ms	モード	メーカー・型番	資料 番号
120	0.1	CW	TE ₀₃	三菱	4
106	400	100	TE _{12,2}	Varian VGB8106A1	2
106	140	100	TE ₀₃	Varian VGB8063	2
106	100	100	TE ₀₃	Varian VGB8053R	2
60	200	100	TE ₀₂	Varian VGB8060	9
59.8	200	500	TE ₀₂	Varian VGE8006	5
56	200	100	TE ₀₂	東芝E3956	4
53.2	200	100	TE ₂₂	Varian VG 5053A	1
53	200	100	TE ₀₂	Varian VG 5053	2
53	200	100	TE ₂₂	Hugh 919H53	2
48	200	30	TE ₂₂	三菱	4
41	200	100	TE ₀₂	東芝E3962	6
40	10	5	TE ₀₂	東芝	4
28	200	75	TE ₀₂	東芝E3955	6
28	200	75	TE ₀₂	Varian VGA8050M	1
28	200	40	TE ₀₂	Varian VGA8008	2
22	30	5	TE ₂₁	東芝	4
9.75	5	30		TV-851	3
	0.1	CW		TV-851	3
8.2	25	CW		VA-876S	10
2.45	5	10		2M13	3
2.45	1	CW			7
2.45	5	CW			8
2.45	50	CW		Thomson CSF TH2075	10
2	350	100		東芝E3781	12
2	1000	10S		NEC LD4444	13
2	1000	10s		東芝E3778	13
0.8	160	100		NEC LD4262	11

表2.2 外国の核融合実験装置でのマイクロ波、ミリ波の利用状況(計画中を除く)

=米国=

装置	研究所	周波数 GHz	電力 MW	内 訳	幅 ms	備考	出典
DIII-D	GA	60	2	0.2MW×10	10s	TE ₀₂ Varian ECH and ECCD	1,5
		110	2	0.5MW×4	10s	TE _{15,2} Varian	1,5
PBX	PPPL	4.6	2			LHCD for 2nd stab. access	
MTX	LLNL	140	400		10ns	FEL	1,8
TEXT	U.Texas	60	0.2		100	f.(v) modification	1
VERSATOR-II	MIT	35	0.1				2
IMS	U.Wisconsin Madison	7.26	0.002		10	Plasma生成	1
ATF	Oak Ridge	53.2	0.4	0.2MW×2	CW	Plasma 生成・加熱	1
Min-B Mirror	Univ.Michigan	7.7	3		10		2
	Ann Arbor	2.45	0.6		10		
MMX	Univ.Cal. Berkley	10	0.25		3μs	マグネトロン	2
Phaedrus-B	Univ.Wisconsin Madison	14	0.05		30		2

=英国=

JET	Culham	3.7	4			LHCD	1
Tosca	Culham	28	0.2		4		2
Cleo	Culham	28	0.2		40		2
		60	0.2		60		2
Compass	Culham	60	0.7		100	X-point control Sawtooth control	3
DITE	Culham	60	0.3			ECH, MHD control, ECCD	1,7
		1.3	0.25			LHCD	1

=独=

ASDEX	IPP Garching	1.3	1			LHCD	1
		2.45	2	0.5MW×4		LHCD	1
Wendelstein VII-AS	IPP Garching	70	0.8	0.2MW×4	3s	Plasma 生成・加熱 電流駆動	1,8
		140	0.5		0.5s		10
			0.2		0.1s		
WEGA	IPF Stuttgart	28	0.2		40		2

=仏=

TORE SUPRA	CEN Cadarache	3.7	0.5	0.5MW×16	210s	LHCD	
------------	---------------	-----	-----	----------	------	------	--

=蘭=

RTP	FOM	60	0.2			ECH	9
-----	-----	----	-----	--	--	-----	---

=イタリア=

装置	研究所	周波数 GHz	電力 MW	内 訳	幅 ms	備考	出典
THOR	1st di Fiscadel Plasma, Milano	28	0.2		10		2

=デンマーク=

Dante	Ris Natl.Lab	18	0.015		10		2
-------	--------------	----	-------	--	----	--	---

=旧ソ連=

T-10	Kurchatov Inst. Atomic Energy	83.6 75	3.6 0.8	0.4MW×9 0.4MW×2	500	生成・加熱・ECCD	1,6
T-7	同上	60	0.4		100		2
FT-1	Ioffe Physicotech Inst. Leningrad	30	0.2		2		2,8
FT-2	"	70	0.1		0.5		2
TUMAN-3	"	37.5	0.07		5		8
L-2	General Phys.Inst. Moskow	75 37.5	0.3 0.2		10 7-8	生成・加熱	4 7
OGRA-4K	リニアカスプ	36.5	0.04		30	高温電子生成	1

=中国=

CT-6B	Academia Sinica Inst. Phys.北京	20.1	0.08		20	Inst. Electronics ECH Chinese Acad.Sciences	7
HT-6B	Academia Sincia IPP 合肥	35 2.45	0.08 0.1		20	LHCD	2 1
HT-6M	同上	35	<0.06				2,7
OEX	Academia Sinica Inst.Phys.北京	36.4	0.04		20		2
Simple Mirror	Academia Sinica Inst.Plasma Phys.	20.5	0.02		20		2
MM-2	South Western Inst. Phys. Leshan	15	0.06		5		2

- 1) Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1990 (Proc. of 13th Conf. Washington, DC., 1-6, Oct., 1990).
- 2) Nuclear Fusion Special Supplement 1986, World Survey of Activities in Controlled Fusion Research 1986 Edition IAEA, Vienna, 1986.
- 3) Nucl. Fusion 31 (1991) 2193-2200.
- 4) Nucl. Fusion 30 (1990) 1850.
- 5) Japan-US Workshop on RF Heating Technology, 27 Feb-1 Mar, 1991, at JAERI Naka.
- 6) Japan-USSR Joint Workshop on Gyrotron Research Oct. 31-Nov.1, 1991 at NIFS Nagoya.
- 7) Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1988, (Proc. of 12th Conf., Oct. 1988).
- 8) Abstracts of "Strong Microwaves in Plasmas", Int. Workshop, Sept. 18-23, 1990, Suzdal, USSR.
- 9) Proc. 16th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, 26-30, August, 1991, Lausanne, Switzerland.
- 10) Private communication.

資料 1.

CHS 装置でのマイクロ波の利用状況と計画

所属機関	文部省核融合科学研究所						
目 的	ヘリオトロン／トルサトロン系プラズマ磁気閉じ込め装置CHSにおけるプラズマ生成と加熱						
高周波源	Varian	VGA8050M	1台	TE ₀₂	28 GHz	200 kW	75 ms
	Varian	VGE8053A	1台	TE ₀₂	53.2 GHz	200 kW	100 ms
伝送系 入射系	28 GHz	ジャイロトロン	TE ₀₂ (63.5mmφ)				
		アークディテクタ	TE ₀₂ (63.5mmφ)				
		モードフィルタ	TE ₀₂ (63.5mmφ)				
		方向性結合器	TE ₀₂ (63.5mmφ)				
		テーパー導波管	TE ₀₂ (63.5mmφ)→TE ₀₂ (37mmφ)				
		コルゲートベンド	TE ₀₂ (37mmφ)				
		モード変換器	TE ₀₂ (37mmφ)→TE ₀₁ (37mmφ)				
		方向性結合器	TE ₀₁ (37mmφ)				
		DCブレイク	TE ₀₁ (37mmφ)				
		テーパー導波管	TE ₀₁ (37mmφ)→TE ₀₁ (63.5mmφ)				
		真空窓	TE ₀₁ (63.5mmφ) 周辺水冷型				
		アンテナ	TE ₀₁ (63.5mmφ) SUS導波管				
	53.2 GHz	ジャイロトロン	TE ₀₂ (63.5mmφ)				
		アークディテクタ	TE ₀₂ (63.5mmφ)				
		モードフィルタ	TE ₀₂ (63.5mmφ)				
		テーパー導波管	TE ₀₂ (63.5mmφ)→TE ₀₂ (27.79mmφ)				
		方向性結合器	TE ₀₂ (27.79mmφ)				
		マイターバンド	TE ₀₂ (27.79mmφ) テーパー導波管付				
		直線導波管	TE ₀₂ (27.29mmφ)				
		マイターベンド	TE ₀₂ (27.29mmφ) テーパー導波管付				
		DCブレイク	TE ₀₂ (27.79mmφ)				
		テーパー導波管	TE ₀₂ (27.79mmφ)→TE ₀₂ (63.5mmφ)				
		真空窓	TE ₀₂ (63.5mmφ) 周辺水冷				
		テーパー導波管	TE ₀₂ (63.5mmφ)→TE ₀₂ (27.79mmφ)				
		ブラソフアンテナ	TE ₀₂ (27.79mmφ)→ガウスビーム				
		反射器	位相補正型集光鏡				
偏波器	変形コルゲート型						
角度可変型反射器	位相補正型集光鏡						
将来計画	・ 53.2 GHz系の増設（ジャイロトロンの新規購入） ・ CHSの2テスラ化による基本波加熱						
参考文献	・ CHSにおける伝送系、ECH実験結果の概要については Annual Review IPPJ (1988-1989) Annual Report NIFS(1989-1990), (1990-1991)のCHSグループのセクション。 ・ 28GHzECH実験結果については S. Kubo, et al., Proc. 1-st Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion, Toki (1989) p240. ・ 53.2GHz第二高調波実験については S. Kubo, et al., Proc. International Workshop on Strong Microwaves in Plasmas, Suzdal, USSR (1990).						

* 資料作成にあたっては核融合科学研究所 久保 伸氏のご協力を得ました。

資料 2.

Heliotron-E 及び Heliotron-DR 装置での
マイクロ波の利用状況と計画

所属機関	京大ヘリオトロン核融合研究センター							
目 的	ヘリカル系磁気閉じ込め装置 Heliotron-E 及び Heiliotron-DR でのプラズマ生成							
高周波源	DR装置	Varian	VGA8008	1台	TE ₀₂	28 GHz	200 kW	40 ms
	E 装置	Varian	VGE8053	3台	TE ₀₂	53 GHz	200 kW	100 ms
		Varian	VGE8053R	1台	TE ₀₃	106GHz	100 kW	100 ms
		Varian	VGB8063	1台	TE ₀₃	106GHz	140 kW	100 ms
		Varian	VGB8106A1	1台	TE _{12,2}	106GHz	400 kW	100 ms
Varian		919H53	1台	TE ₀₂	53GHz	200 kW	100 ms	
伝送系 入射系	53 GHz 2系	TE ₀₂ (63.5mmφ)→TE ₀₂ (27.79mmφ)→TE ₀₁ →kスペクトロメーター→TE ₀₁ (35mmφ) →ウインドウ→TE ₀₁ (19.05mmφ)→TE ₁₁ →HE ₁₁ (19.05mmφ)→HE ₁₁ ホーン(1.75inchφ)						
	53 GHz 2系	TE ₀₂ (63.5mmφ)→TE ₀₂ (25.6mmφ)→TE ₀₂ (63.5mmφ) →ウインドウ→直管						
	28 GHz 1系	TE ₀₂ (63.5mmφ)→ウインドウ						
将来計画	・ 入射時フォーカスによるパワーデポジションの局在化 ・ 高ベータプラズマの生成 ・ 周辺プラズマの加熱 ・ ECRHパワーの増強							
参考文献								
・ Heliotron-E 及び Heliotron-DR における実験に関する論文 は、PPLKレポートPPLK-9 "Heliotron E Results 1981-March 1988"を参照 下さい。								
・ 最近の実験及び今後の計画については T. Obiki, et al., Fusion technology 17 (1990)101 に述べられていま す。								
・ 106GHz ECRHシステムに関する論文 M. Iima, et al., Conf.Digest 14th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Wurzburg, 1989, p.405 M. Sato, et al., Conf. on Infrared and Millimeter Waves, 1991								

* 資料作成にあたっては京大ヘリオトロン核融合研究センター 関子秀樹、
長崎百伸 氏のご協力を得ました。

資料3. 東北大学ヘリアック装置でのマイクロ波の利用状況と計画

所属機関	東北大学工学部原子核工学科		
目的	プラズマ生成 プラズマ加熱 (ECRH)		
高周波源	メーカー 型番 発振周波数 電力 パルスモード CW モード パルス幅 電源	日本高周波株式会社 MPS-10-01 9.75 GHz クライストロン TV-851 x2 5 kW 100 W 0.1-30 msec 44 kVA TV-851 4本分の仕様	
伝送系	導波管	WRJ-10	
入射系	ホーンアンテナ 偏波面回転可能		
将来計画	TV-851を2本追加し、電力を10 kWに増やす予定。		
目的	プラズマ生成 (ECH) 予備電離 放電洗浄		
高周波源	メーカー 型番 発振周波数 電力 パルス幅 電源	電気興業株式会社 UP-5 2.45 GHz マグネトロン 2M13 パルスモード 5 kW 1-10 msec 1 kVA コンデンサー充電方式	
伝送系	導波管	WRJ-2	
入射系	ヘリカルアンテナ		
将来計画	CW運転可能なように改造予定		
参考文献			
1) H. Watanabe, S. Kitajima, N. Takeuchi and M. Takayama: Proc. 7th Int. Workshop on Stellarators, 1989 (IAEA-TECDOC-558, 1990) p.215.			
2) S. Kitajima, M. Takayama, T. Zama, M. Takahashi, N. Takeuchi and H. Watanabe: Proc. 1st Int. Toki Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion, 1989(NIFS-PROC-3, Nagoya, 1990) p.97.			
3) S. Kitajima, M. Takayama, T. Zama, T. Takaya, N. Takeuchi and H. Watanabe: Jpn. J. Appl. Phys. 27(1991) 2606.			

* 資料作成にあたっては東北大学工学部原子核工学科 渡辺博茂氏のご協力を得ました。

資料 4.

WT-3 装置でのミリ波の利用状況と計画

所属機関	京都大学理学部
目 的	ECH, ECCD
高周波源	東芝 E3956、 TE_{02} 、200 kW、100 msec、56 GHz
伝送系 入射系	69 mm ϕ sus 管、テーパー、25 mm ϕ コルゲート導波管 ブラゾフアンテナ + 楕円筒面鏡、入射角可変
将来計画	2システムに増設したい。
参考文献	13th Intern. Conf. on Plasma Phys. and Contrl. Nuclear Fusion Research IAEA-CN-53 / E-3-5
目 的	ECH, ECCD
高周波源	三菱 TE_{02} 、200 kW、30 msec、48 GHz
伝送系 入射系	51 mm ϕ Cu 管、マイターベンド、テーパー、25 mm ϕ (未定) ブラゾフアンテナ + 楕円筒面鏡、入射角可変の予定
将来計画	①パルス幅 100 msec、②出力 350 kW に増力したい。(電源及びジャイロトロン)、③出力 ~ 1 MW に増力したい。(電源、ジャイロトロン、SC Magnet)、④数システムに増設し、多重周波 ECH を試みたい。
目 的	ECR 予備電離
高周波源	高圧電源 = パルス電子。磁場 = 常電導コイル (大澄)、電源 (= IDX)、ジャイロトロン = 東芝、 TE_{01} 、30 kW、5 msec、22 GHz、 TE_{02} 、10 kW、5 msec、40 GHz (2nd)
伝送系 入射系	28 mm ϕ テーパー - 51 mm ϕ テーパー - 28 mm ϕ 28 mm ϕ 導波管きりっぱなし
将来計画	2nd harmonic 専用管として新たに設計しなおしたい。
目 的	散乱計測
高周波源	ジャイロトロン = 三菱 (組立管)、 TE_{03} 、100 W、CW、120 GHz 高圧電源 = パルス電子。磁場 = SC coil (東芝)、電源 (= IDX)
伝送系 入射系	28 mm ϕ Cu 管 ブラゾフアンテナ + 楕円筒面鏡
将来計画	SC coil 系を新しくしたい。(現状: He 消費量大、運転時間短) 2nd harmonic で 300 GHz、CW 管を新設したい。
参考文献	9th Int. Conf. on Infrared mm wave Takarazuka, 1984 Th-8-5

注: 将来計画は予算的裏付けなし。

資料5. J E T - 2 M 装置でのマイクロ波の利用状況と計画

所属機関	日本原子力研究所 炉心プラズマ研究部プラズマ物理実験研究室
目的	トカマクプラズマ電流駆動
高周波源	ジャイロトロン Varian VGE8006 2本 電源 三菱電機製 -90kV, 45A モード 円形TE ₀₂ (発振) 周波数 59.8 GHz 電力 400 kW (発振) 250 kW (入射) パルス幅 0.5 sec
伝送系	方式 円形オーバーサイズ導波管、TE ₀₁ モード伝送、2系統 コンポーネント モード変換器 2種類 (TE ₀₂ - TE ₀₁ , TE ₀₁ - TE ₁₁) コルゲートベンド、アーク検出器など
入射系	アンテナ 円形ホーンアンテナ TE ₁₁ モード入射 k 変換ミラー
将来計画	那珂研移設に伴いトカマクの磁場増力 (1.4 Tから2.1 T以上へ) 出力増力 (1 MW以上)
参考文献 1. 星野、山本 他: JAERI-M 83-148(1983). (モード変換器の設計) 2. 星野、山本 他: JAERI-M 85-169(1985). (ECH装置設計) 3. K. Hoshino, T. Yamamoto et al., Phys. Rev. Lett. 63. 770 (1989). (ECHによるHモード生成)	

* 資料作成にあたっては日本原子力研究所炉心プラズマ研究部プラズマ物理実験研究室星野克道氏のご協力を得ました

資料 6. タンデムミラー装置ガンマ 10 でのマイクロ波の利用状況と計画

所属機関	筑波大学プラズマ研究センター
目的	ガンマ10はタンデムミラー型のプラズマ閉じ込め装置である。中央ソレノイドの両外側に極小のミラーをもったMHD安定化のためのアンカー部を置き、その両側の軸対称ミラー磁場のなかに電位分布を作り、磁気ミラー効果で閉じこめられないピッチ角の小さい粒子の流出を静電的にせきとめ（plugging）構成になっている。その5箇所各々のミラー磁場において、両端の軸対称のために、マイクロ波加熱が適用され、即ち、両端の軸対称ミラーの磁気中央面では電位の谷を深くする（サーマルバリア）28 GHzジャイロトロンによる第二高調波加熱で数10 keVの平均エネルギーをもった磁気捕捉の高温電子を生成する。すぐ外側の隣りの磁気勾配域の1T層では同周波数のジャイロトロンによる基本波加熱で数keVの電子加熱を行い、μgradB力による加速にバランスする静電場を発生させ、中央ミラーからのイオンの流出を止めるための電位の山を形成する。マイクロ波によるこの電位形成が現在のタンデムミラー閉じ込めの基本となっている。アンカー部においては41 GHzのジャイロトロンによる第二高調波加熱を用いて平均約100 keVの高温電子加熱が最近開始された。目的は2つある。第1の目的は「良い曲率」部のベータ値を高くすることであり、MHD安定化力を増強しベータ限界値を高めようとする点にある。アンカー部は密度が高くなる傾向にあるため、非軸対称磁場で電位の山が発生すると予想される。この山は本来円形をしてたいたドリフト面をひずませ径方向の輸送を助長する恐れがあるため、磁気捕捉電子を生成し、その空間電荷効果で電位分布を平坦化するのが第2の目的である。現在までに磁気中央面で14%の電子ベータ値を得ているが最終目標は30%と設定している。中央ミラー部では28 GHzジャイロトロンによる基本波加熱が開始された。これは文字どおりの電子加熱である。第二高調波加熱もできるよう準備されている。
高調波源	ジャイロトロン： 東芝E3955 28 GHz、TE_{02}、200 kW、75 msec プラグ部2箇所、サーマルバリア部2箇所、 中央ミラー部1箇所にて使用 東芝E3962 41 GHz、TE_{02}、200 kW、100 msec アンカー部2箇所にて使用。 電源：コンデンサバンク方式 変調管によりカソード・ボディー間を変電圧制御。 プラグ部とアンカー部加熱用はジャイロトロン2台を共通電源で駆動。 アンカー部と中央ミラー部のジャイロトロンは独立に陽極変調が可能。
伝送系	ジャイロトロン出力窓の上にDCブレークを置く。 放電抑制ガス（N_2またはSF_6）導入部。 荷重保護・軸調整用ベローズ導波管。 62.5 mm-37mm raised-cosine テーパ。 コルゲートバンド。

	TE ₀₂ モード選択型方向性結合器。 直径37 mm円筒導波管によるTE ₀₂ モード伝送を標準とする。
入射系	ブラソフ・中島型アンテナによるXモードペンシルビーム。入射 回転平面反射板による透過マイクロ波ビームの再入射
将来計画	1) 現在の7台のシャイロトロンを用いて、より高効率の電位形 成と高電子ベータの達成をめざすのが基本計画である。 2) TE ₀₁ モード変換による高純度モード伝送と入射角度変更の試 行。 3) 共鳴層照射分布制御実験。 4) 端損失熱流制御実験。 閉じ込め域外側の端部磁場勾配部に2.45GHz ECRHを行い磁気 ミラー効果を利用して閉じ込め域への低温電子流入の制御を おこなう。 5) タンデムミラーの基本である電位閉じ込めにはマイクロ波加 熱が必須である。長期的にはさらに大電力のマイクロ波源と 伝送系が必要になることは間違いない。
参考文献（マイクロ波加熱技術に関するもの） 1) "Electron Cyclotron Heating in the Tandem Mirror GAMMA10 by Using 28GHz Gyrotron", T. Saito, Y. Kiwamoto et al. 9th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, Takarazuka, Japan (1984) 363-364, (Conf. Digest, Jpn. Soc. Appl. Phys., Tokyo 1984). 2) "High-power Microwave Vacuum Window of Fused Quartz in Circular Waveguide", T. Saito, Y. Kiwamoto et al. Rev. Sci. Instrum. 56 (1985) 764-765. 3) "Observation of Frequency Pulling Effect in Gyrotron", T. Kariya, T. Saito, Y. Kiwamoto et al. Jpn. J. of App. Phys. 25 (1986) 645 -655. 4) "Mode-selective Directional Coupler for High Power Microwave Measurements", T. Saito, H. Masabayashi, T. Kariya, Y. Kiwamoto et al., Jpn. J. Appl. Phys. 26 (1987) 1392-1393. 5) "Analysis and Optimization of Stepwise Modulated TE _{0n} Mode- Converter", Y. Kiwamoto, T. Honda, A. Kasugai, Saito et al. Rev. Sci. Instrum. 62 (1991) 178-188. 6) "Analysis of Multimode Microwaves in an Oversized Waveguide Using Infrared Camera Image", Y. Kiwamoto, F. Kira, T. Saito, et al. Rev. Sci. Instrum. 62 (1991) No.12. 3075-3081. 7) "A Microwave Mode Analyzer with Dispersive Reflector Antenna" Y. Kiwamoto, F. Kira, T. Saito et al., to be published in Rev. Sci. Instrum. (1992). No.5	

資料7. 大口径高密度均一プラズマ発生用平面ECRアンテナ装置
でのマイクロ波（ミリ波）の利用状況と計画

所属機関	東北大学工学部
目 的	電子サイクロトロン共鳴（ECR）を利用したプラズマプロセスの重要性が指摘されている。しかしながら、生成したプラズマの均一度が本質的な問題点となっているのが現状である ¹⁻²⁾ 。本研究では、プロセスで必要とされている低圧力、無磁場、高イオン電流密度、低イオンエネルギープラズマを大面積均一に発生させるため、永久磁石を内蔵した平面スロット大型大口径ECRアンテナを新しく開発・製作し ³⁻⁴⁾ 、プラズマプロセスへの早期実用化をすることを目的とする。
高調波源	ANELVA Corp (F90159)、0 ～ 1 kW、連続発振、2.45 GHz
伝送系	矩形導波管、方向性結合器、整合器、同軸導波管変換器、同軸管（図1参照）
入射系	4並列型平面スロットアンテナ（図2参照）
将来計画	これまで26 cm×26 cmの平面ECRアンテナを製作し、発生したプラズマの空間分布を調べることににより、マイクロ波入力約100 Wで均一度±2%、直径約20 cm（8インチ）、プラズマ密度がおおよそ$2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$のプラズマの生成に成功した。また、アンテナ近傍での永久磁石による磁力線分布の重要性を指摘してきた⁵⁾。これらの結果をふまえて、更に高密度大口径均一プラズマを得るため次の計画が予定されている。 1) 最適な永久磁石配列を明らかにする。 2) アンテナ形状及び結電方法を工夫し、アンテナと伝送系とのインピーダンス整合を改善する。 3) アンテナ板背後でのブレイクダウンによるマイクロ波パワーの損失を極力軽減できる構造にし、高効率化を図る。 4) 同軸導波管の口径を広げ、またアンテナ及びマイクロ波ウィンドー・給電部の冷却を行い、高入力パワーに耐え得るアンテナ系を確立する。 以上によりマイクロ波入力を1 kW程度まで増力し、均一度±2%で直径約26 cm（10インチ）、プラズマ密度がおおよそ$5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$のプラズマの達成を目指す。
参考文献	1) S. Iizuka, D. H. Ko, N. Sato, M. Takahashi, and A. Kodama, Proc. 2nd Jpn. Symp. Plasma Chem. 2 (1989) 293. 2) S. Iizuka and N. Sato, J. Appl. Phys. 70 (1991) 4165. 3) N. Sato, S. Iizuka, K. Seino, and Y. Nakagawa, 第13回研究会資料、日本学術振興会第153委員会、(1991) 25. 4) S. Iizuka, N. Sato, K. Seino, and Y. Nakagawa, Proc. 4th Jpn. Symp. Plasma Chem. 4 (1992) (in press). 5) S. Iizuka, K. Seino, K. Yazawa, Y. Nakagawa, and N. Sato, Proc. 9th Symp. Plasma Proc. (1992) (in press).

* 資料作成にあたっては東北大学工学部、佐藤徳芳、飯塚哲氏、日電アネルバ（株）中川行人氏のご協力を得ました。

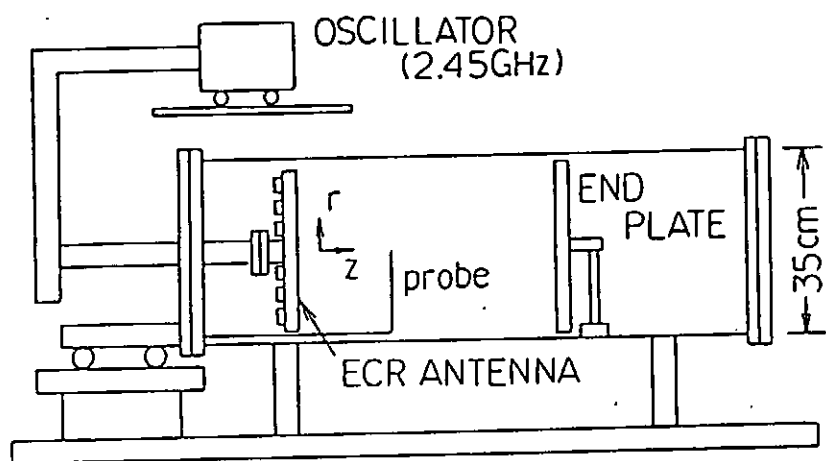


図1 実験装置図

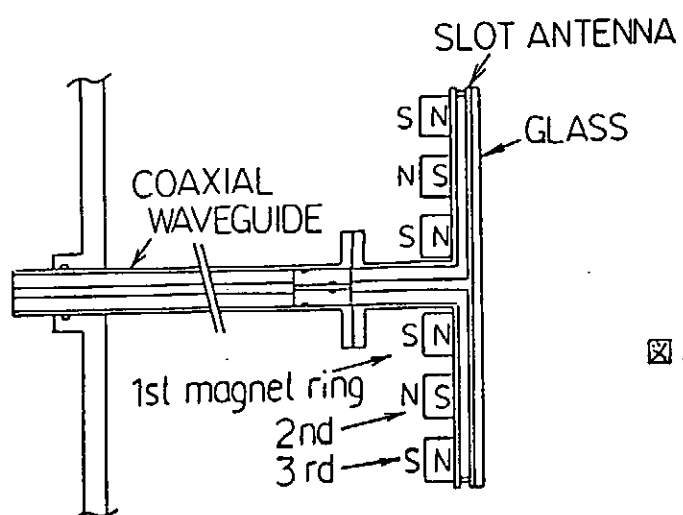


図2 アンテナ構造図

資料 8. マルチスロット型アンテナ及び電子サイクロトロン波を用いた
プラズマ発生装置でのマイクロ波（ミリ波）の利用状況と計画

所属機関	九州大学大学院総合理工学研究科	
目 的	1) マルチスロット型アンテナを用いた研究は、空間的に一様で直径の大きい高温高密度プラズマを生成すること及びその生成機構を解明することを目的としている。この研究では、主に直径の大きさと半径方向の一様性を問題にしている。 2) 電子サイクロトロン波を用いた研究は、高温高密度プラズマを生成すること及びその生成機構を明らかにすることを目的としている。現在、低圧力領域でミラー磁場中に発生する高温電子の加速機構に関する研究を重点的に行っている。 3) ECRプラズマを研究している目的の一つは、ECRプラズマをプロセスングに応用し、エッチング、薄膜製作等の高効率化、高性能化等を実現することである。	
高調波源	メーカー 型番 モード 電力 パルス幅	東京電子株式会社 IMG-2502-S IMG-2505IN IMG-2505-S 短形TE ₁₀ 1.3 kW(IMG-2502-S) 5 kW(IMG-2505IN 及び IMG-2505-s) CW
伝送系	方式 コンポーネント	矩形導波管(図1参照) 矩形導波管と円形導波管(図2参照) アイソレーター、EHチューナー 方向性結合器、スタブチューナー モード変換器(円矩形導波管) 円偏波励振器(図1、2参照)
入射系	アンテナの形式	マルチスロット型アンテナ(図3参照) 導波管を直接放電管に接続(図4参照)
将来計画	マイクロ波の周波数の変更、パワーの増強等の計画は特にはないが、アンテナの改良等を行い、より高温でより高密度のプラズマの実現を目指して研究を進める予定である。	
参考文献 1) Y. Kawai and K. Sakamoto, Rev. Sci. Instrum. 53, 606 (1982). 2) A. Komori, et al., Appl. Phys. 69, 1974 (1991). 3) M. Tanaka, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 60, 1600 (1991).		

* 資料作成にあたっては九州大学大学院総合理工学研究科 河合良信氏のご協力を得ました。

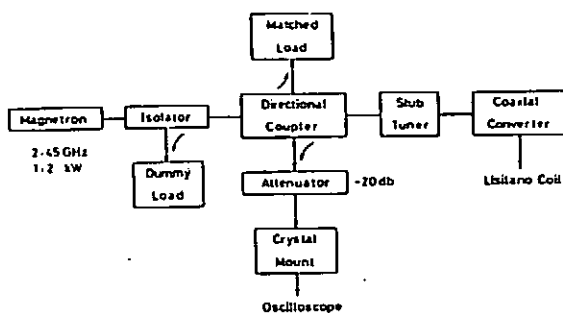


図 1. マルチスロット型アンテナを用いた実験のマイクロ波回路

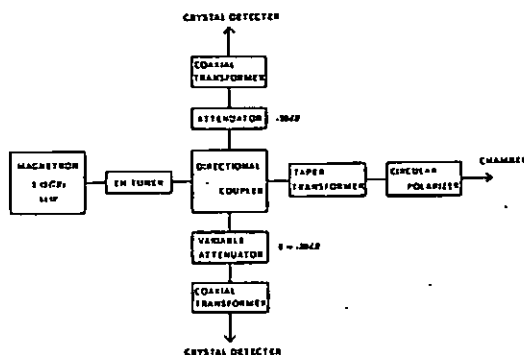


図 2. 電子サイクロトロン波を用いた実験のマイクロ波回路

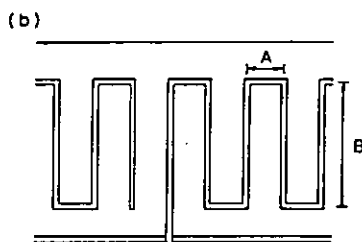
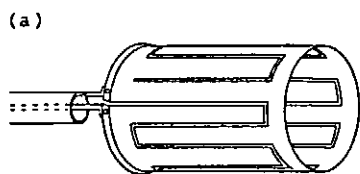


図 3. マルチスロット型アンテナ(a)概略図(b)スリット部分の拡大図
A+Bがマイクロ波の半波長になっている

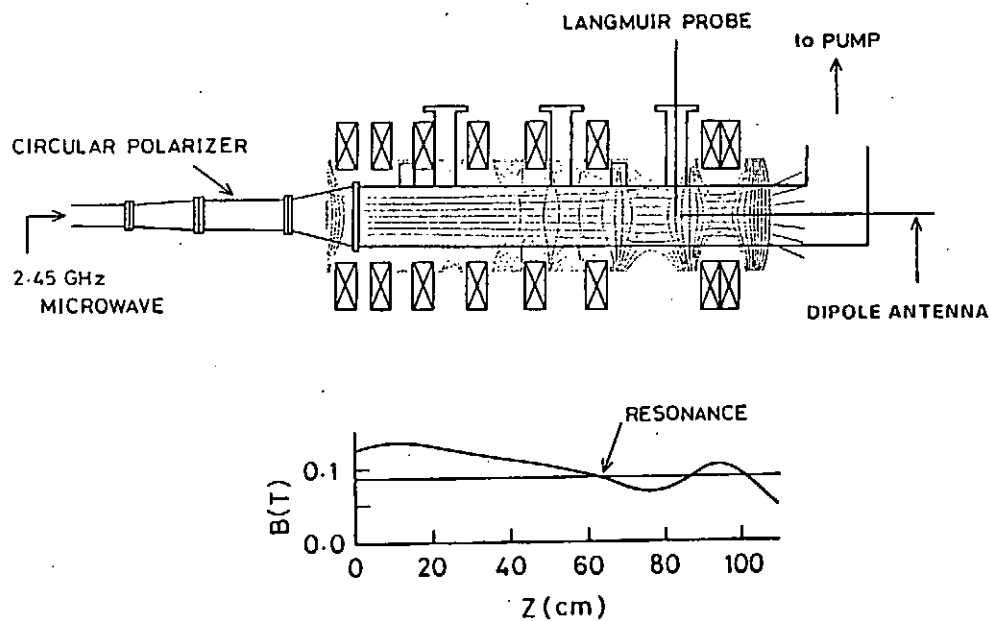


図 4. 電子サイクロトロン波を用いた実験装置の概略図

資料 9.

電磁エネルギービーム発生装置としてのミリ波の
利用状況と利用計画

所属機関	大阪大学溶接工学研究所
目 的	1) 大出力電磁エネルギービームの一つであるジャイロトロンからの大出力波を強収束し、高エネルギー密度熱源とする研究を行う。 2) この新しい高エネルギー密度ビームを材料加工の基礎研究に適用する。具体的にはセラミックス加熱の研究を行い、従来より優れた機能を持つセラミックス作成を行う。 3) このミリ波ビームを超伝導コイルの強磁場中に入射してECRミラープラズマを発生しその特性を解明する。また、このプラズマを利用したプラズマ放射光源や多価イオン源としての基礎研究を行う。
高調波源	メーカー：三菱電機（株） ジャイロトロン：バリアン製 VGE8060 1台 モード：TE ₀₂ 電力：最大200 kW パルス巾：最大100 mS 周波数：60 GHz
伝送系	方式：導波管式 コンポーネント：アークディテクター モードフィルター コルゲート導波管 テーパー管 直線導波管 方向性結合器
入射系	アンテナの形式：準光学的アンテナ （楕円筒及び放物面筒収束反射板）
将来計画	・電源のCW化により最大10 kWの出力を得る。球のはすでにテスト済みである。 ・これによりセラミックス加熱システム、および多価イオン源としての実用的かつシステム化された研究を行う。
参考文献 1) Y. Arata, S. Miyake, H. Kishimoto, N. Abe and Y. Kawai: Jpn. J. Appl. Phys., 27(1988) 1281. 2) Y. Arata, S. Miyake and H. Kishimoto: Jpn. J. Appl. Phys., 28 (1989) 234. 3) S. Miyake, O. Wada, M. Nakajima, T. Idehara and G. F. Brand: Int. J. Electronics (1991) 979.	

*資料作成にあたっては大阪大学溶接工学研究所 三宅正司氏のご協力を得ました。

所属機関	九州大学応用力学研究所 強磁場プラズマ・材料実験施設
目 的	トカマク型核融合炉の定常運転化を実現するために、超伝導トカマク装置TRIAM-1Mを用いて、低域混成波による非誘導電流駆動 (Lower Hybrid Current Drive) の実験を実施している。特に TRIAM-1Mにおいては、プラズマ閉じ込め用のトロイダル磁場を定常的に発生できるため、他の装置では出来ない長時間放電が可能であり、LHCDによる定常トカマクプラズマの生成及び閉じ込めに関する研究を推進している。
高周波源 伝送系 入射系	仏国トムソンCSF社製クライストロン (TH2075) モード TE_{01} 周波数 2.45 GHz 出力電力 50 kW パルス幅 CW 日本高周波株式会社製ビーム電源 電圧26 kV/電流3.5 A 伝送系=導波管伝送方式にてクライストロンの出力をサーキュレータを通してマジックTにて4分岐し、入射系へ伝送する。入射系=4導波管列グリル型 導波管寸法(間隔) 15 mm×71 mm (19 mm) 米国バリアン社製クライストロン (VA-876S) モード TE_{01} 周波数 8.2 GHz 出力電力 25 kW×8 パルス幅 CW 愛知電気株式会社製ビーム電源: 電圧22 kV/電流3.5 A 伝送系=導波管伝送方式にて8台のクライストロン出力をそれぞれサーキュレータを通してマジックTにて2分岐し、入射系へ伝送する。 入射系=8導波管列2段グリル型 導波管寸法(間隔) 4mm×35mm (5 mm)
将来計画	8.2GHz LHCDシステム(200 kW,CW)を増設することを計画している。
参考文献	1) S. Itoh, N. Hiraki, Y. Nakamura, et al., in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1988 (Proc. 12th Int. Conf. Nice, 1988), Vol.1, IAEA, Vienna (1989) 629. 2) A. Nagao, E. Jotaki, S. Moriyama, et al., Jpn. J. Appl. Phys., 28 (1989) 1486. 3) S. Moriyama, Y. Nakamura, A. Nagao, et al., Nucl. Fusion, 30 (1990) 47. 4) Y. Nakamura, Y. Takabatake, E. Jotaki, et al., Nucl. Fusion, 30 (1990) 689. 5) S. Itoh, N. Hiraki, Y. Nakamura, et al., in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1990 (Proc. 13th Int. Conf. Washington, D.C., 1990), Vol.1, IAEA, Vienna, (1991) 733.

* 資料作成にあたっては九州大学応用力学研究所 強磁場プラズマ・材料実験施設 中村幸男氏のご協力を得ました。

資料 1 1. J I P P T - I I U 装置でのマイクロ波の利用状況と計画

所属機関	文部省核融合科学研究所
目 的	=マルチジャンクショングリルの結合特性の実験と理論的解析の比較検討= 低域混成波によるトロイダル電流駆動効率の向上とアンテナ・伝送系を目指したグリルアンテナの改良の一つとしてマルチジャンクショングリル結合器が大型装置で使われている。JIPPT-IIU トカマクプラズマを用いて、4分岐グリルの電力放射部による結合特性を測定し、ジャンクション部とグリルマウスでの散乱行列による結合解析モデルの妥当性を検証する。
高周波源	メーカー 日本電気 LD4262 台数 2台 モード 同軸管出力 周波数 0.8 GHz 電力 160 kW パルス幅 20 ms (最大出力時) ~ 100 ms 電源: 愛知電機製作所 コンデンサーバンク方式 電圧 38 kV 陽極変調: 研究所開発 4PR250
伝送系 入射系	標準グリル型: パイロット出力を2分岐して片側は移相器を通しクライストロン1とクライストロン2を励振する。それぞれの出力はサーキュレータを介してマジックTで電力2分割され4つ出力を得る。このうち2つは大電力用の移相器を通す。これで4つの導波管群での移相は任意に変えることが出来る。この出力が可変長導波管、ウインドウを通してプラズマ中に低域混成波を入射される。 マルチジャンクション型: 標準型の2つのサーキュレータ出力をマジックTで電力合成して1導波管伝送にする。この出力を可変長導波管に送り、マルチジャンクションで電力4分割を行い、長さの異なった変形導波管を通して移相差をつけウインドウを持つ電力放射器に導く。 グリル: 4導波管型 導波管寸法 3.5×24.7cm 1/2管内波長型アルミナセラミック製
将来計画	大電力入射時に於けるマルチジャンクショングリルの結合特性の研究
参考文献 1) K. Ohkubo, et al.: Nucl. Fusion 22 (1981) 203. 2) K. Ohkubo: J. Phys. E. Sci. Instrum 16 (1982) 715. 3) N. Noda et al.: Nucl. Fusion 22 (1982) 115. 4) K. Toi et al.: Phys. Rev. Lett. 52 (1984) 2144. 5) K. Ohkubo et al.: Nucl. Fusion 26 (1985) 732. 6) K. Ohkubo et al.: Phys. Rev. Lett. 56 (1987) 2040. 7) K. Ohkubo and K. Matsumoto: Jpn. J. Appl. Phys. 26 (1987) 142. 8) K. Toi et al.: Nucl. Fusion 28 (1988) 147. 9) K. Matsumoto and K. Ohkubo: Jpn. J. Appl. Phys. 28 (1990) 2011. 10) S. Morita et al.: Nucl. Fusion 30 (1990) 938. 11) S. Morita et al.: J. Phys. Soc. Jpn. 60 (1991) 122. 12) K. Ohkubo: Jan. J. Appl. Phys. 30 (1991) L1212.	

資料 1 2. WT-3 装置でのマイクロ波（ミリ波）の利用状況と計画

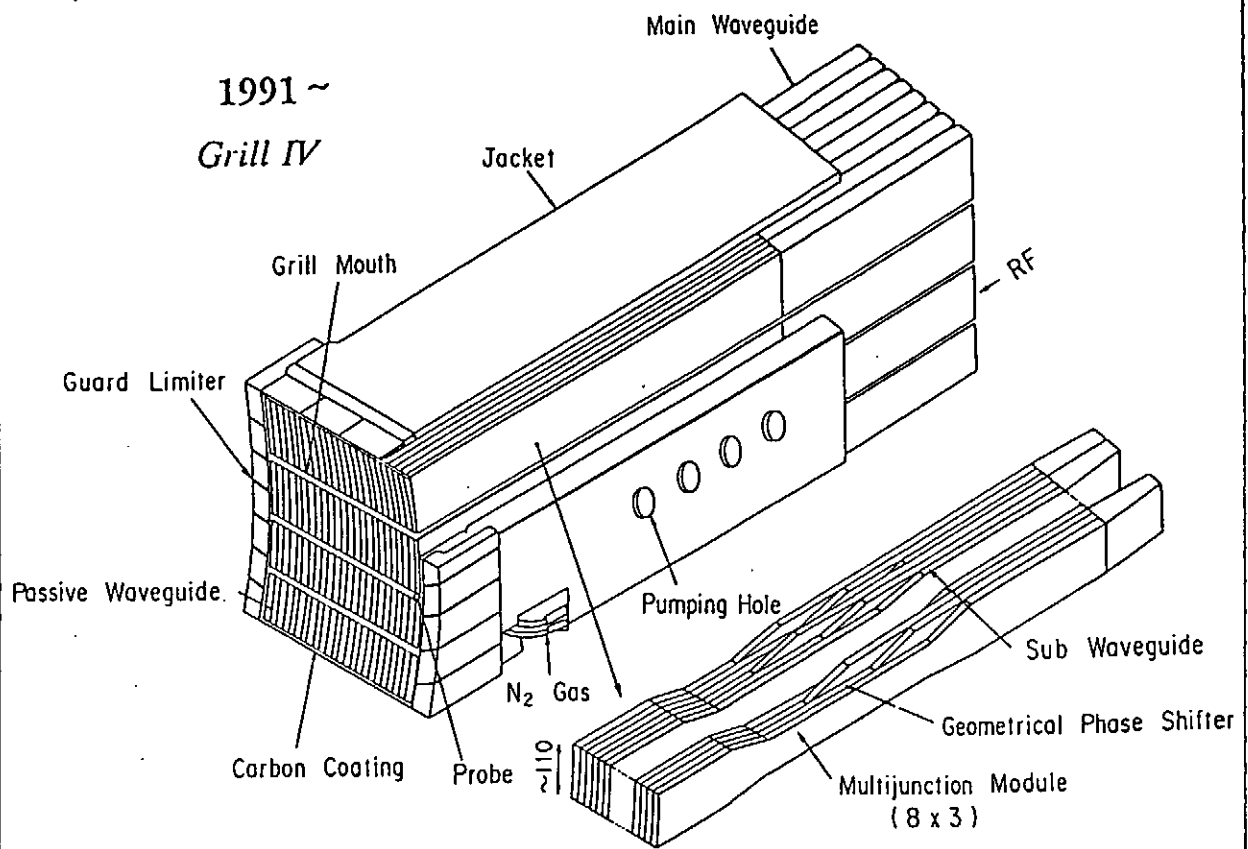
所属機関	京都大学理学部
目 的	LHCD
高周波源	東芝 E3781、クライストロン TE ₁₀ 、 350 kW、100 msec、 2 GHz
伝送系	標準短形導波管、 アイソレーター
入射系	4WG array × 2
将来計画	位相器を導入したい。 （現状：導波管長をかえて $\pm \pi / 2, \pi$ モード）
備考	任意波形発生可
参考文献 13th Intern. Conf. on Plasma Phys. and Contrl. Nuclear Fusion Research IAEA-CN-53 / E-3-5	

注：将来計画は予算的裏付けなし。

資料 13. JT-60U 装置でのマイクロ波（ミリ波）の利用状況と計画

所属機関	日本原子力研究所
目 的	核融合プラズマの高周波による電流駆動と加熱 JT-60U における低域混成波電流駆動によるトカマク定常化研究及び分布制御によるプラズマ性能の向上研究。
高周波源	（全体システム）： 原発振器（HP8660C）の信号を8分配し、個体増幅器で1 Wレベルにし、進行波管により数10 Wに増幅し、1 MW クライストロンへ入力される。8本のクライストロンで1ユニットを構成し、これが、3式、合計24本のクライストロンで全体が構成されている。直流電源（DCG）は、14 MVAタイプと7 MVAタイプの2種類あり、前者は1台で4本のクライストロンを、後者は2本を駆動する。ビーム電流制御用アノード電源、及びクライストロン保護用のクローバスイッチを保有している。 メーカー NEC 電力 1 MW クライストロン 24本 電源（DCG） 14 MVA型 87 kV×130 A 2台 7 MVA型 87 kV× 65 A 8台 （クライストロン）： JT-60の加熱、電流駆動用に原研と東芝、NECが共同で開発し、核融合研究用の長パルス（10秒、高パワー1 MW）のクライストロンである。東芝製とNEC製の2種類あり、基本性能は同じである。周波数は1.74～2.23GHzの範囲で可変である。効率は約50%であり、コレクタの冷却は蒸発冷却を採用している。 メーカー 東芝-E3778、NEC-LD4444 モード 2 GHz、TE₀₁ 電力 1 MW パルス幅 10秒 （デューティ1/15）
伝送方式	クライストロン出力をマジック T で4分配し、大電力の移相器を介してセミフレキシブルコルゲート導波管を通して、入射系である位相制御型多導波管アンテナの垂直方向の4段のそれぞれの導波管に給電される。導波管、短形導波管及びコルゲート導波管
入射系	プラズマ中の低域混成波と結合させるため、磁場方向の波の位相速度が光速より遅くなるような遅波構造を持ったアンテナにする必要があり、プラズマに面する開口部は導波管を磁場方向に多数並べた構造をしている。電流駆動効率や分布制御特性の向上のために、1つの導波管を内部 E 面で、さらに3分岐し、それぞれの副導波管に、固定の位相器を設置し、実効的に後方のシステムを複雑にせず、高性能化を行っている。図1参照。位相制御型多導波管（固定位相器付副導波管内臓（MJ型）） 24×4導波管1基
将来計画	MJ型 48×4導波管アンテナ1基の導入（1993） ECH用 ミリ波源（ジャイロトロン）数MW（時期未定）
参考文献	1) T. Nagashima et al., Fusion Eng. Des. 5 (1987) 101. 2) T. Imai, et al., Fusion Eng. Des. 13 (1990) 177. 3) Y. Ikeda, et al., Fusion Eng. Des. 13 (1990) 209.

* 資料作成にあたっては日本原子力研究所 今井剛氏のご協力を得ました。



3. 大出力マイクロ波源の開発状況と展望

3.1 ジャイロトロン管

核融合実験用ジャイロトロンの世界の開発現状について概説する。

技術開発

技術開発は、大電力、長パルス～CW管の試作を主体にしている。ITER, 大型トカマク, LHD等のECRHが求めているECRH用ジャイロトロンは、単管出力1 MW以上、数秒～連続発振、周波数80～140 GHzである。試作開発は、日、米、露（旧ソ連）等で1985年ごろから開始された。出力0.5～1 MW, 短パルス（<0.1 sec）の試作は成功裡に終了した。電子銃からインターラクションキャビティにいたる発振部（ロワーボディ）は熱平衡時定数が数十～数百msec程度であり、長パルス～CW化にあたっては基本的に同一の設計となる。発振モードは、米、日がホイスポリングギャラリーモード（ $TE_{12,2} \sim TE_{15,2}$ ）、露が少し高めのモード（ $TE_{16,4} \sim TE_{18,4}$ ）を採用している。大電力化、長パルス化に伴い、口径を大きくする為に方位角方向のモード数 m を22程度まで拡大するが、モード競合はこの程度までの拡大では、処理可能であると考えられている。発振後の電子ビーム（Spent electron beam）の処理方法及びマイクロ波出力窓が、長パルス～CW化における技術開発の主要課題である。コレクターへの電子ビームの入力は、平均1 kW/cm² 以下、ピークで2 kW/cm² 程度に保つ必要がある。コレクターが出力導波管を兼用した短パルス試作管や従来の200 KW管の方式では、コレクターの口径が100 mm以上にできないので、著しく長くしない限り表面積が不足する。これを解決する為に、使用済みの電子ビームとマイクロ波を分離する機構が必要になる。露では、比較的開発の初期段階からウラソフコンバータといわれる準光学モード変換器をインターラクションキャビティの真上に組み込み、マイクロ波をビーム（ TEM_{00} が主成分）として横方向に取り出し、電子ビームはそのまま上方方向に導き大型コレクターに吸収する。日本もほぼ同様の構成を採用している。最近、準光学コンバータの変換効率を向上させる方式が露で開発された。実測で95 %以上の結果が得られている。

これに対し米では、導波路にギャップを設け電子ビームを磁界で曲げて、そのギャップから横方向に引き出す方式を考案している。この方式では、マイクロ波はギャップで若干のものを生じるものの、ほとんど（95 %以上）ギャップを越えて出力窓までキャビティと同一のモードで導かれる。最初の試作管の試験が開始されたところである。

いずれの方式でも、スペント電子ビームを誘導し一様に拡散させる為に、ガイド磁界の設計・調整が重要である。コレクター表面での磁界は数十～数百ガウス程度と低い値である。外部からの横方向の磁界成分等が加わると、非軸対称となり電子ビームの偏向をおこし、局部過剰加熱の原因となる。大型、長パルス～CW管の開発・運用における今後の最も懸念される問題となるであろう。

ウラソフコンバータを組み込んだ構成では、出力がガウス分布に近くなる。ウィンドウ中心付近に電界の大きい部分が集中する。現在開発されている低損失セラミック材では、液体窒素ないし液体ヘリウム温度まで冷却しないと、1 MW CWの通過に耐えられない。日、露（独）で試作が行われている。ホイスポリングギャラリーの出力の場合は、電界が周辺部に分散するので既存の表面冷却方式で可能であると考えられている。この方式ではフロロカーボン（FC-75）を冷却液に使用する。将来、フロロカーボンが生産中止になった場合に備えて、代替品を開発しておく必要があるだろう。

新方式の開発

周波数の可変化を主要な目的として、ファブリーペロー共振器をインターアクションキャビティとした準光学ジャイロトロンの研究が続けられている。発振効率を高める研究が行われており、15～20 %の効率を得るまでになってきた（スイス／日、米）。大電力（大電流）化に伴うビームの空間電荷効果の取扱いが次の研究課題である。この方式では、マイクロ波ビームと電子ビームは直交しているので、分離機構は不必要である。そのかわり、ファブリーペロー共振器から出力を効率良く取り出すミラー系の開発が必要となる。

高周波化の方向として、200～300 GHz帯の短パルス管が日、米、露、その他で試作されている。低周波化の方向として、ローハイブリッド用の8 GHz、0.5～1 MW級の開発が仏、米で行われており完成の域に達した。仏ではTE₀₁₁等のボディモードを採用し、従来型の構成でウィンドウに導き、外側にコンバータを接続している。

大出力管の運用

米で開発されているジャイロトロンは、先に述べた様にホイリスパリングギャラリモードで出力される。ウィンドウの口径は80～110 mmφと波長に比較して大きい。モード変換器を効率良くコンパクトに作る為には、口径を下げる必要がある。目下のところ、ダウンテーパー管等を接続すると、当該モードの出力が低下すると推定される事態が発生している。モードの測定等、今後の運用上の課題が多い。

3. 2 自由電子レーザ (FEL)

表3.2.1は、マイクロ波、ミリ波の大出力FELの開発動向をそのタイプ別にまとめたものである。

誘導加速器を用いたFEL

1986年に、アメリカのローレンス・リバモア研究所 (LLR) が、誘導加速器を多段に接続して得た3.3 MeV、500 A、パルス幅15 nsの電子ビームと、強度が空間的に次第に変化するテーパードウィグラ (ウィグラ周期9.8 cm) と組み合わせて、周波数34 GHz、出力1 GWのミリ波をエネルギー変換効率35 %で発生させる事に成功した。これに刺激されて、プラズマのECR加熱をこのタイプのFELで行う計画が提案された。ジャイロトロンを用いるECR加熱では、連続波 (CW) モードで数 MWの大電力ミリ波をプラズマに照射するのに対し、このFELによるECR加熱では、数 GW、パルス幅数10 nsecのパルスを磁気スイッチにより数 kHzでの繰り返しで照射する方法をとる。MITのトカマクALCATOR-CがLLR研究所に移設され、FELによるECR加熱を行うMTX (Microwave Tokamak Experiment) 計画が進められている。この実験では、加速器のビームラインは約40 m、ウィグラは約5 mという大規模なものである。1990年には、単一パルスによるECR加熱実験が行われたが、全加熱エネルギーが単一パルスであるので未だ小さい。1991年以降、本格的な高繰り返しパルスでの加熱実験が予定されている。

国内では、誘導加速器タイプのFELは、大阪大学レーザ研究所、高エネルギー研究所、原子力研究所で行われている。理化学研究所では、光電子や冷陰極放出とマルクス電源を組み合わせたFELを研究している。

FEL電子管化の動き

1977年頃から自由電子レーザは、研究実験用の装置として開発されてきたが、近年マイクロ波領域でFELを高出力パルスクライストロンに類似な形で実用的な電子管として、開発する動きが見られる。その構成は、通常の電圧数100KV、パルス幅数 μ secのモジュレータ電源と熱陰極銃を組み合わせて、ウィグラ磁界領域と一体化するもので、マイクロ波領域ではパルス幅数 μ secで1 MW程度までの出力が得られている。

フランスのTTE社 (Thomson Tubes Electroniques) は、アメリカのMITと共同で700 kVのモジュレータ電源を用いて電子管的にコンパクトにまとめられた装置を開発している。Kaバンドの20-40 dBの増幅が予定されている。アメリカのNRL研究所では、SLACクライストロン用の熱陰極銃 (250 keV, 100 A) を用いて、12.6-17.5 GHz領域のマイクロ波をパルス幅2 μ sec、出力700 kW、エネルギー変換効率7 %程度で発生させた。

コンパクトFEL

既に述べた現在のLLRタイプのFELでは、装置は大型である。これを小型、安価にするには、装置のかなりの部分を占める加速器と電源を小型にしなければならない。このためには、(1)ウィグラ周期の短いマイクロウィグラを用いる事によって、電子ビームに必要とされるエネルギーを小さくする。(2)マイクロウィグラを採用すると、磁界方向のギャップが狭くなるので電流値が不足する場合には、シート状の電子ビームを利用して必要な電流を得る。(3)ウィグラ領域を通過した使用済みの電子ビームのエネルギーと電荷を回収し、加速電源の小型化を図る。

MITでは、フェライトコアに巻線を巻いた電磁石を用いてウィグラー周期2.4 mm、磁界強度19.4 kGのマイクロウィグラーを開発した。電子ビームの通過するチャンネルとなるエアギャップは3 mmであり、ウィグラーを構成する各電磁石を個別の電源で励磁する事により磁界強度の制御が出来る。

マイクロウィグラーで磁界強度を大きくしようとすると、この様にウィグラー磁界方向のギャップが狭くなる。ここに、FELに必要な電流密度の電子ビームを通過させるためには、シート状(リボン状)の電子ビームが適している。アメリカのメリーランド大学では、周期長1 cm、磁界強度1.5 kG、ギャップ3.2 mmのマイクロウィグラーに500keV、7A、断面形状1 mm×35.5 mmの電子ビームを伝搬させ、43 GHzのミリ波発振を観測している。以上のような研究成果から、プラズマのECR加熱に用いるコンパクトなFELの提案が出されている。アメリカ、メリーランド大学のGranatsteinらは、周期長1 cm、磁界10 kGの超伝導ウィグラーコイルに1.5MeV、5Aのシート状電子ビームを伝搬させ、周波数560 GHz、出力1 MWのミリ波を発生させることを提案した。使用済みの電子ビームエネルギーの70 %を回収することによりシステムの全エネルギー効率は、35 %になる。欧州共同体のEURA-TOM-FOM研究所では、1 MeV、30 Aの電子ビームをマイクロウィグラーに伝搬させ、150-300 GHzのECR用のミリ波を1 MW発生させる提案をしている。使用済みの電子ビームを99.6 %回収することによって、1 MV、100 mAの電源によって、定常動作が可能になる。

更に、ウィグラー磁界部をコンパクトにするよう、円形FELが提案された。従来のFELでは数 mにわたる直線上ウィグラーが必要であったのに対して、円形FELでは半径数cmの円周上にウィグラーが配置された円形ウィグラーに沿って、回転電子ビームを伝搬させ、FEL相互作用をこの円周上で維持しようとするものである。我が国の宇宙科学研究所では、500 KeV、200 A、半径6 cmの回転電子ビームを、周期数12の円形ウィグラーに入射して130 kW(11.5 GHz)の自励発振を得た。電子エネルギーを変化させることにより、発振周波数を11 ~39 GHzの間で連続的に変化させることが出来た。現在、更なる高出力化と高周波化に努力している。

表3. 2. 1 マイクロ波、ミリ波FEL

	電子ビーム		ウイグラー周期	発振周波数	出 力	パルス幅
	MeV	A	cm	GHz	MW	ns
誘導加速器FEL						
ILL	3.3	500	9.8	34	1000	20
	6					
	6	2000		140	400	20
大阪大学	2	200	3	380	5	50
高エネ研	0.8	500	16	9.4	1.3	50
原子力研	1					
マルクスFEL						
理研	0.6	10	1.5	34	0.1	1000
電子管化FEL						
TTE/MIT	0.7			Ka		
NRL	0.26		90	17	0.7	1000
コンパクト化FEL						
MIT	0.45		0.24			
メーランド大	0.5	7	1	43		
円形FEL						
宇宙研	.5~		200 n=12	11~39	0.1	600
	0.2	200				

3.3 クライストロン

近年のマイクロ波管の開発は、衛星関連、加速器、核融合関連に集中している。このうち、加速器、核融合関係では、極めて大きい出力性能を持つクライストロンの開発が、そのシステム開発の一つの鍵となっている。

大電力クライストロンの開発には、長い開発期間を必要とするため、昨年度の調査報告以来格段の進展は見られないが、加速器、核融合関係の用途に供するべく開発済み、または開発中の超大電力クライストロンの開発動向を再度報告する。

加速器の分野では、パルスと連続波の2種類のクライストロンが開発されている。パルスクライストロンとしては、S, X帯の超大電力管の開発が急がれている。S帯で100 MWパルスクライストロンがすでに開発され^{1)・2)}、数十MWから100 MWに至る数機種の開発が並行している。X帯では30 MW管、続いて100 MW管の開発が始まっている³⁾。これらの大電力管は大型線形加速器の高周波源に使用され、今後SORやFELのための入射器用高周波源としても用途が広がると思われる。

連続波関係では、高エネルギー物理学研究所のトリスタン用に、全長約4.5 mの超大型クライストロン (500 MHz/1.2 MW)⁴⁾ が実用され、引き続きL帯でMW級を目指す大型管が開発中である⁵⁾。

核融合関係では、10秒程度の比較的長いパルスから連続波に至る超大電力クライストロンが開発されている。すでに2 GHz, 1.4 MW, 10 sの長パルスクライストロンが日本原子力研究所のJT-60計画に使用され^{6)・7)}、引き続き、C帯で数100 KW~MWを目標とした開発が始まっている。

表3.3.1に、開発済み、及び開発中の大電力クライストロンの動作使用をまとめて示す。本調査報告書の作成に当たり、(株)東芝および日本電気の御助力を戴いたのであわせて深謝する。

[参考文献]

- 1) H.Yonezawa, et al.:Development of a 100 MW S-band Klystron, XIVth Int. Conf. on High Energy Accelerators, Aug. 1989, Tsukuba.
- 2) 米澤、他: An S-band 100 MW Pulse Klystron, 第14回ライナック研究会、89年9月、奈良。
- 3) J.Odagiri, et al.:Development of X-band High Power Pulsed Klystron, 第16回ライナック研究会、91年9月、東京。
- 4) 岡本他: 加速器用 1.2 MW連続波大電力クライストロン、東芝レビュー、41巻10号、86年10月。
- 5) 佐藤、他: Development of High Power L-band Klystron, 大16回ライナック研究会、91年9月、東京。
- 6) S.Miyake, et al.:Development of 2 GHz, 1 MW Klystron for Plasma Heating, IEDM'84, Dec. 1984, San Francisco.
- 7) 岡本、他: 核融合・高周波加熱用 1 MWクライストロン、東芝レビュー、40巻8号、85年8月。
- 8) Nagashima et al.:Test Results of 0.5 MW Gyrotron at 120 GHz and 1.4 MW Klystron at 2GHz for Fusion Application, Int. Workshop on Strong Microwave in Plasmas, Sep. 1990, Suzdal.

表3. 3. 1 クライストロン開発の動向

=連続波クライストロン=

型 番	メーカ	周波数 (MHz, GHz)	出力電力 (MW)	ビーム電圧 (kV)	ビーム電流 (A)	備 考
TH2089	T-CSF	352 (MHz)	1.1	87.5	18.5	Acc. LE P/CERN
YH1350	VALVO	352	1.1	90	18	Acc. LE P/CERN
PEP	SLAC	353.2	0.5	62	11.5	Acc. PE P/SLAC
VKP-8259B	Varian	500	0.3	44	15	
E3774	Toshiba	500.1	0.18	42	9	
E3786	Toshiba	508.6	1.2	93	21	Acc. TR ISTAN/KEK
YK1303	VALVO	509	1.0	87	19	Acc. TR ISTAN/KEK
YK1301	VALVO	500	0.8	75	16.2	Acc. PE TRA/DESY
YK1300	VALVO	508.6	1.0	87	19	Acc. CE SR/Cornell
E3780	Toshiba	915	0.2	45	7.4	岩石粉碎 実験
VKS-8269A	Varian	2.45(GHz)	0.5	62	16	LHCD Princeton
TH2075	T-CSF	2.45	0.05	26	3.5	LHCD TR IAN/Kyushu
E3726	Toshiba	2.45	0.1	42	3.5	開発中
VKC-7849	Varian	4.60	0.25	46.5	12.5	LHCD & LHH
VA-876	Varian	8.20	0.025	22	3.5	LHCD TRIAN/Kyushu
VA-949	Varian	7.1-8.5	0.2	50	10	Comm. J PL/NASA
LD4595	NEC	14.0-14.5	0.003	10.7	0.9	Comm.
LD4407	NEC	29.6-31.0	0.0005	11.0	0.5	Comm.

=パルスクライストロン=

型 番	メーカ	周波数 (MHz, GHz)	ピーク電力 (MW)	ビーム電圧 (kV)	ビーム電流 (A)	パルス幅 (ms)	備 考
L-5773	Litton	425 (MHz)	1.25	92	29	0.2	JIPPT-IIU/NIFS
LD4262	NEC	800	0.2	35	13	100	
VA-862A	Varian	805	1.25	86	30	1	
YK1240	VALVO	1.3 (GHz)	0.33	60	10	1.2(s)	
1AV65	Toshiba	1.3	3	130	94	3(μ s)	Radar
VA-963A	Var./NEC	1.25-1.35	5	130	101	3(μ s)	
LD4444	NEC	1.7-2.23	1	85	25.5	10(s)	
E3778	Toshiba	1.7-2.26	1.4	87	31	10(s)	
PV3030B	Mitsubishi	2.856	30	270	295		Acc.
5045	SLAC	2.856	67	350	414		Acc.
E3776	Toshiba	2.856	21	250	195	4(μ s)	Acc.
E3726	Toshiba	2.856	60	340	397	2(μ s)	開発中
E3712	Toshiba	2.856	100	450	604	1(μ s)	Acc.
E3719	Toshiba	2.998	7.5	160	115	5(μ s)	
F2042	T-CSF	2.998	30	275	280		Acc.
YK1600	VALVO	2.998	35	270	292		Acc.
3AV85	Toshiba	2.7-2.9	1.5	79	44	4(μ s)	
TH2103	T-CSF	3.7	0.5	58	19	210(s)	LHCD TORE-SUPRA
VA-146C	Varian	5.4-5.9	3.2	137	95	12.5(μ s)	
E3716	Toshiba	11.424	20	450	170	1(μ s)	Acc.開発中
E3717	Toshiba	11.424	100	550	490	0.4(μ s)	Acc.開発中
LD4398	NEC	28	0.005	18	0.92	10	ECH Heliotron/Kyoto
LD4321	NEC	35.5	0.004	18	0.92	10	ECH Nagoya
LD4399	NEC	45	0.001	18	0.92	10	ECH Heliotron/Kyoto

3. 4 REBを用いたマイクロ波源

静止質量程度あるいはそれ以上の運動エネルギーを持つ電子ビームをREB (Relativistic Electron Beam) と呼ぶ。REB源としては標準的にマルクス高電圧発生器、パルス整形線路及び冷陰極を持つダイオードを使用するいわゆるパルスパワー発生装置、rf線形加速器、誘導線形加速器等がある。現在開発されつつあるREBを利用するマイクロ波・ミリ波源としては、いわゆる自由電子レーザー以外に、電子サイクロトロン・メーザー (ECM)、チェレンコフ・メーザー (CM)、相対論的マグネトロン、相対論的後進波管 (Relativistic BWO)、相対論的クライストロン等の従来からの研究の延長線上にあるものと、VIRCATOR (Virtual Cathode Oscillator) のように大電流REB源特有の性質を利用するものがある。これらに使用されているREB源は主にパルスパワー発生装置である。このREB源の特徴としてまず挙げられるのは電子エネルギーが比較的高いこと ($\sim$ MV)、及び電流がとれること ($0.1 \sim 100$ kA) である。従って高出力 ($\sim$ GW) のマイクロ波・ミリ波の発生が可能となる。しかし電圧が高いためにパルス運転 (10 ns $\sim$ 10 μ s) となりマイクロ波・ミリ波の発生時間が短い。このようなマイクロ波・ミリ波源に共通する今後の開発課題としては長パルスREB源あるいは高繰り返しREB源の開発、より高出力になった場合及び短波長化して導波管あるいはキャビティ等の境界構造が小さくなった場合のrf放電破壊現象にどう対処するか、またワンパルス間の電圧、電流、が一定でなくそのために発生するマイクロ波ミリ波の周波数や出力が安定しない事をどう克服するか等が挙げられよう。

3. 4. 1 ECM, CM以外のマイクロ波源

REBを用いるマイクロ波源のうちCARM (Cyclotron Autoresonance Maser) 等の電子サイクロトロン・メーザー系の開発状況については3.4.2で、チェレンコフ・メーザーについては3.4.3でまとめることとし、ここではその他の主な機種について述べ、主な装置例を挙げる。

相対論的マグネトロン

REBを用いたマグネトロン研究は1975年MITのBekefiに始まり米国及び旧ソ連で研究が進められてきた。原理的には従来のマグネトロンと変わらない。周波数数GHzで出力数GWの発振が得られている。パルス幅は数10 nsである。現在注目を引くのはPhysics International社で行われている仕事である。1基のパルスパワー発生装置で数基の数GW級のマグネトロンを駆動しそれらを導波管で連結することにより位相固定をして数10 GW級の出力を得ることを目標にして研究が進められている。

表 3. 4. 1 装置例 I

Laboratory	REB			Microwave				備考
	V(MV)	I_b (kA)	t_b (ns)	f(GHz)	P(GW)	t_w (ns)	η (%)	
Physics International	1	(2.8Ω) [*]	120	2.8	3	30		phase-locking

^{*}: diode impedance

相対論的後進波管 (Relativistic BWO) 及びその変形

1970年代前半にMarylandと旧ソ連のGor'kiiのInstitute of Applied Physicsで研究が始まり両国で研究が続行されている。リップル構造の遅波回路が用いられている。バンド幅が狭い、高出力、高効率、装置が比較的シンプルという利点がある。TomskのHigh Current Electronics InstituteのBugaev等が開発しているMWCG (Multi-wave Cerenkov Generator) 装置では高出力でrf放電を避けるために管径を波長の数倍というオーバーサイズにし、そこに2基の遅波構造を設けてフィードバックをかけ周波数を固定し出力を上げるという方法で高出力を得ている。しかしまだrf放電破壊を逃れることはできていない。彼らはMMCGと類似のRDG (Relativistic Diffraction Generator) と呼ばれる装置も開発している。前者が表面波との相互作用に基づいているのに対してこの装置ではrf絶縁破壊に関してより有利な空間波が利用されている。一方Maryland大ではプラズマを発振管内に導入し真空の空間電荷制限電流以上のビーム電流が伝播できるようにしてマイクロ波出力を上げることを試みている。我国では新潟大で実験が計画されている。

表 3. 4. 2 装置例 II

Laboratory	REB			Microwave				備考
	V(MV)	I _b (kA)	t _b (ns)	f(GHz)	P(GW)	t _w (ns)	η(%)	
High Current Electronics Institute	1.6	15	1000	9.4	15	60	50	MWCG
	1.5	16	1000	44-46	5-7	200-260	29	RDG
	1.6	17	1000	27-33	6-9		33	RDG
Maryland Univ.	0.6-0.85	2-4	100	8.4	0.1-0.2	10-20	5	
	0.63	2.3		8.4	0.45		40	plasma BWO

VIRCATOR

REB発生部から真空中にREBを射出する際、REB電流が空間電荷制限電流を越えていると仮想陰極が前方に生じ、ビーム電子は陰極と仮想陰極との間で振動する。また仮想陰極自体の位置と電位も振動する。その際に高出力のマイクロ波が発生する。これを利用するものがVIRCATORであり、1977年にNRLのMahaffeyにより最初に報告された。発振機構としてはビーム電子の往復運動と仮想陰極の振動の二つがある。電流が大きく、かつマイクロ波を発生させるための特別な構造が必要ではないのでrf放電破壊電圧も高いことにより発生マイクロ波のパワーは高く、周波数0.7~1 GHzで出力が40 GWに達する例もある。数10GHzでの発振の可能性もある。しかしダイオード電圧とダイオード電流が変化するためにワンショットの中での周波数変化と振幅変化が大きい。Physics International社のBenford等は仮想陰極領域を共鳴空洞構造で囲むという方法で一定周波数でかつ安定な単一モードの発振を得る方法を開発した。更にこの方式のVIRCATORをいくつか位相固定して連結して10 GW以上のパワーを得る方向で開発研究を続けている。位相固定の方法としては同じパルスパワー発生装置で1基の相対論的マグネトロンと数基のVIRCATORを駆動し、マグネトロンをマスター発振器として用い、またVIRCATOR同士も導波管で連結するということを試みている。LANLでは共鳴空洞方式のVIRCATORが増幅器として働くことを示し、パルス幅を長くする方向で研究を続けている。

旧ソ連でもMoscow Technical InsituteやTomskのInstitute of Nuclear Physicsで調べられているが、後者ではVIRCATORからの放射を共鳴器に蓄積してから短い時間の間に放出するというスキームが試みられている。我国では姫路工大で小規模な研究が行われている。

表 3. 4. 3 装置例 III

Laboratory	REB			Microwave				備考
	V(MV)	I _b (kA)	t _b (ns)	f(GHz)	P(GW)	t _w (ns)	η(%)	
Harry Diamond Laboratory	8	250		0.8-1	40	50	1.8	
LANL	1.8	90		30-40	0.1			
Physics International	0.75	80		2.85	1	40		phase-locking

変調REBによる相対論的クライストロン

NRLのFriedman等は同軸空洞にREBを通すことによりビーム電流を100 %近く変調させることができること、そしてこれはビームの自己電場によって変形された空間電荷波によることを示した。この変形空間電荷波は小パワーの外部rf源により励起することができ、それによってREBを効率よく変調できる。その際電子のバンチはrf源に位相固定される。変調されたビームからrfパワーを取り出す。この方法では通常のクライストロンとちがって長いドリフト領域は必要でない。またビームの自己電場により高電圧ギャップの電場構造が変形されrf放電が起こりにくくなることにより高出力マイクロ波がビームが続いている間発生している。

表 3. 4. 4 装置例 IV

Laboratory	REB			Microwave				備考
	V(MV)	I _b (kA)	t _b (ns)	f(GHz)	P(GW)	t _w (ns)	η(%)	
NRL (amplifier)	0.5	16	120	1.328	5×10 ⁻⁴ → 3	120		

3. 4. 2 電子サイクロトロン・メーザー

電子サイクロトロン・メーザー装置としては、ジャイロトロン、CARM (Cyclotron Autoresonance Maser)、ジャイロ-BWO、ジャイロクライストロン等が挙げられる。ここではジャイロトロン以外の方式について触れる事にする。現実的に実験装置が計画・稼働している主なものを表3.4.5に挙げる。(表中で $\alpha = V_{\perp}/V_{\parallel}$)

CARM

この方式はFELに比べて、装置が軸対称で比較的簡便である。またジャイロトロンに比べて、周波数に対する必要磁場が低く、発振領域が空間的に広く熱負荷の問題が軽減され、高効率動作が期待できる等の利点が挙げられる。しかし高効率・高出力動作のためには、ビームの質に対する要求が厳しく、軸方向エネルギー幅、ピッチアングル等REBにとっては制御が難しい条件が課せられる。そこで一旦REBを電極から磁場軸方向に引きだした後、ビームの一部を削りだし、回転方向速度成分 $V_{\perp}$ をもたせ、しかも $V_{\perp}$ の広がりを抑えるといった装置の設計を慎重に行う事が重要になる。この点に注意して表1に掲げた装置の特徴を以下に述べる。

ゴーリキで初めてCARMの実験が成功した。パルス幅は100 nsであるが電圧の頂上平坦部は約50nsでその間に20-30 ns幅のマイクロ波が発生している。 $V_{\perp}$ を与える方式はパルス磁場内に銅リングを置き周期的に磁場強度を弱めており、 α として約0.2の値を得ている。この値の低い事が効率にも響いているとされる。発振領域は円形導波管の両端に波状の壁のブラッグミラーを用いた方式であり、モードは TE_{11} を用いている。

MITでの実験は増幅と自励発振双方の結果が報告されている。表に掲げた出力は17 kWの入力マイクロ波に対する増幅動作の時のもので、自励発振時の出力は100 kWが報告されている。REBの特徴として、電極部で20 kAのビームをアノードに開けた長細い穴(エミッタンスセクター)を通過させる事で、電流130 A、軸方向エネルギー幅4 %のビームを取り出し、その下流で二重螺旋型磁場を用いて α 値を0.3にしている。発振領域は長さ約1 mの円形導波管であり、 TE_{11} モードを用いている。この長さにわたってマイクロ波の成長率は増幅で55 dB/m、自励発振で42 dB/mの値が報告されている。

NRLで計画された装置はその前に100 MW、35 GHz付近のKaバンドジャイロトロンに用いられたものの改造版で、電極構造を綿密に計算し、陰極は材質の構成により電子放出部と電場整形部に分けてある。電極部をでた時点でビームは軸方向を向いており、中空である。これを一様磁場中にもうけたキッカーを通す事で α が0.6のビームとする。エネルギー幅は約10 %と計算されている。発振部はブラッグミラーを用いて全体の長さ約7 cm、 TE_{11} モード付近を狙っている。特にジャイロトロンモードとの競合を嫌って意識して設計されている。

ここに掲げた装置は高速コンデンサーバンク及びパルス整形線路を電源として使用し、冷陰極放電でREBを得ている。このためビームの質を制御する事が困難である。そこで、MIT、NRLでは個体素子を用いた線形加速器、電子管化された電子銃、また長パルス化等を行ってビームの質の改善を計画・実験している。この他にも低エネルギーの電子銃を用いたCARMはUCLA等で計画されている。

ジャイロ-BWO

ジャイロ-BWOは発振部は単純な導波管型で、一般のBWOの様に周期的な構造を必要とせず、導波管の遮断周波数以上の広い領域で周波数を変える事ができる。

ミシガンでは円柱(0.5-2kA)または中空円筒状ビーム(0.15-0.3 kA)を用いている。TE₀₁基本モードの他に、TE₀₂及びTE₁₁の2次高調波からの発振も得ている。

金沢での実験は中空円筒状ビームを用いTE₀₁モードとの2次高調波の発振を得ている。この実験では100 m分散線路を用いて発振周波数領域約7-20 GHzを観測しているが、未同定なピークも観測しており、これらはREBの質の問題が関与していると考えている。

ジャイロクライストロン

ジャイロクライストロンの場合もビームの質に対する要請は厳しく、ビーム発生部、磁場は厳密に設計され、電極は動作の安定している熱陰極型のものが使用されている。

メリランドの実験では2または3空洞のものを使用してモードは主にTE₀₁である。ビームの電極部はマグネトロン型で熱陰極を用い1 μsのフラットトップな安定した動作を確保している。出力については現在140 MWの計画がある。

この他にもNRL、UCLA等で計画がある。

表3. 4. 5 電子サイクロトロン・メーザー装置

	電子ビーム				磁場 kG	発振周波数 GHz	出力 MW	効率 %
	MeV	kA	ns	α				
CARM								
ブーキ	0.6	1.0	100	0.2	20	125	10	2
MIT	1.5	0.13	30	0.3	6-8	35	12	6.3
NRL	0.6	0.2	50	0.6	25	100	10	20
ジャイロ-BWO								
ミシガン大	0.6-0.9	0.3-2	500-1500		3-7	4.5-6	0.1-8	
金沢大	0.6	0.2	20		4-8	8-10	>0.1	
ジャイロクライストロン								
メリランド大	0.43	0.23	1000		5.2	10	23	27

3. 4. 3 チェレンコフ・メーザー

チェレンコフ放射は荷電粒子が光速以上のスピードで誘電体の中またはすぐ側を通過するときに発生する。誘電体チェレンコフ・メーザー (DCM; Dielectric Cherenkov Maser) では誘電体が張り付けられた導

波管中で軸方向に電場をもつ TM_{0n} のモードがREB（相対論的電子ビーム）により励起され、ビームのバンチングを起こしレーザー動作をする。DCMはミリ波及びサブミリ波のコヒーレントな光源として有用であると考えられ、原理実験が行われている。発振周波数は導波管のサイズやビームのエネルギー、誘電体の厚さ、誘電率 ϵ 、モード（ TM_{01} 、 TM_{02} ）等のパラメータの選択で変えることができる。

DCMは位相速度が光速以下の電磁波を利用すると言う意味でTWT（進行波管）と類似する。ただしTWTでは軸方向のモードの離散によって同調周波数に跳びが起こる。これに対しDCMではシングルモードでのオペレーションが可能であり、ビームの加速電圧によって周波数は連続可変であるという際だった特徴を持つ。この意味でBWG（後進波管）と似ている。ただし、構造が非常に簡単であること、またmm波の発振器としてDCMの方が効率が高いという点で異なる。

表3.4.6にマルクスジェネレーターを用いた主な発振実験を示す。記載した一連の実験において円形導波管が用いられている。導波管サイズは大きいほど周波数は下がるが一般的に大きな出力が得られているようである。最高出力で580 MW、変換効率として15 %という値が報告されている。周波数の高い側では0.375 mmの波長の発振がなされている。他方、ここでは示されていないが、熱陰極を用いた電流が数十 A以下では比較的高い効率（6~7 %以上）の発振例が多くある。

増幅器としての動作実験はカリフォルニア大学アーバインからの報告がある。高電流・高電圧のもとでは自励発振が相当レベルあるが入力を入れることによって周波数固定が起こり出力の増加が観測されている。

以上のような利点があるが、DCMでは誘電体の表面に沿ってREBを伝搬させることから、ビームがうまく伝搬させられない場合が問題となる。また他方で電界が誘電体表面で最大となるため、数百MW程度の高出力動作のもとでは誘電体表面でのrf絶縁破壊によってパルス長が長くできないという問題が起こってくる。尚、誘電体の代わりにプラズマを用いるプラズマ・チェレンコフ・レーザー（PCM; Plasma Cherenkov Maser）についても研究が進められているが現在まだ見るべき成果は得られていない。

表3. 4. 6 マルクスジェネレータを用いた発振実験

研究機関	ビーム		導波管サイズ	誘電体	出力	波長
	電圧 [kV] ・ 電流 [A]		直径 [mm]	ϵ	P [W]	λ [mm]
Dartmouth	400-1000	500			1k	4
"	"	50-100	3-4	2	1k-25	2-1
"	"				10k	0.375
Irvine	500-1000	10k	72.8	10	200M	79
"	"	"	"	5	80M	43
"	"	"	"	2.3	数M	33
Tomsk	650	6.5k	50	3.67	580M	35

NIFS-MEMOシリーズ出版リスト
(Recent Issues of NIFS-MEMO Series)

- NIFS-MEMO-1 都築哲哉、東井和夫、松浦清剛、「パソコンによる JIPP T-IIU プラズマの平衡位置
フィードバック制御」1991年 4月
T.Tsuzuki, K.Toi and K.Matsuura, "Feedback Control of Plasma Equilibrium
with Control System Aided by Personal Computer on the JIPP T-II
Tokamak" ; Apr.1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-2 久保田雄輔、大林治夫、宮原 昭、大野和子、中村光一、堀井憲爾、「環境磁界の研究
(I) 三次元積分磁束計の開発」1991年 7月
Y.Kubota, H.Obayashi, A.Miyahara, K.Ohno, K.Nakamura and K.Horii,
"Development of Three-Dimensional Compact Magnetic Dosimeter for
Environmental Magnetic Field Monitoring" , July,1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-3 「核融合科学研究所技術研究会; 1991年3月19、20日 土岐文化プラザ」1991年8月
"Proceedings of Symposium on Technology in Laboratories; Mar. 19, 20, 1991" ,
Aug. 1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-4 「プラズマ中におけるカオス現象」1991年8月
"Chaotic Phenomena in Plasmas " , Aug. 1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-5 山崎耕造、「ファジー論理のトロイダルプラズマ制御への応用」1992年2月
"Fuzzy Logic Application to Troidal Plasma Contol" , Feb. 1992 (In Japanese)