〔解説〕

原子力エレクトロニクスの新展開

Novel Research Evolution in Nuclear Electronics

小 林 直 人　吉 田 貞 史　奥 村　元

N. KOBAYASHI　S. YOSHIDA　H. OKUMURA

Novel scheme of research and development in “nuclear electronics” is overviewed. “Nuclear Electronics” involves a new field in electronics for semiconducting materials, electronic devices, circuits and their integrated system especilally used in radiation environments including nuclear power plants, accelerator facilities and space facilities. Promotion of research in material processing for device fabrication using low-z semiconducting materials, e.g. SiC, is necessary in order to meet demands of efficiency and safety on nuclear electronics. This report reveals research subjects requisite for nuclear electronics, which consisting of 3 major sub-subjects of researches on (1)junction formation, (2)electric conduction control and (3)evaluation techniques for radiation effect.

§１　はじめに

安定で豊かな人間活動を支えるためには物質，情報，エネルギー，環境がそれぞれ大きな役割を果たしている。原子力の果たす役割はこの中で，主として物質およびエネルギー・環境に係わるものと言えよう。原子力技術は，端的に言えば自然界に存在したり人工的に発生させるさまざまな放射線を物質・生命・エネルギー・環境の面に利用していく技術（放射線利用技術），およびそれらの放射線から人間・生物・物質を防護する技術（放射線防護・安全技術）と捉えることができる。その際人間活動への原子力技術の適用を可能にさせるのがエレクトロニクスであり，これを特に「原子力エレクトロニクス」と呼ぶことができる。エレクトロニクスの側面から見れば原子力はその適用の一分野であり，原子力技術から見ればエレクトロニクスを媒介として社会とのつながりを具現化することが可能となると言うことが出来る。その意味では人間活動と原子力を媒介するものが原子力エレクトロニクスである。（従来英語でいう“nuclear electronics”というのは，原子核実験や放射線計測等で使用される特殊な検出器，回路，信号処理系等を指していたが，ここではこの言葉はこれに加えて原子力分野で使用されるエレクトロニクスという幅広い定義で考えている。）

このような原子力エレクトロニクスに特有の課題は，一言で言えば効率性と安全性である。効率性とは原子力技術特有の大量高速情報処理（たとえば核融合プラズマの観測に見られるような大量のデータの一括高速処理等）に象徴されるものである。これらは原子力分野以外への波及効果も大きく，一例を挙げれば従来原子核実験で用いられた高速データ収集･処理システムは，さまざまな標準規格を生み出し，原子力以外の分野にも利用されている。一方安全性は原子力技術に特に必要なものであり，原子炉・加速器施設・核燃料再処理施設などの原子力施設や宇宙空間など高放射線環境下やあるいは高温下における各種機器・システムにおいては，その安全動作および耐久性を保証することが要請されている。

ここでは，上記のうち研究開発への要請が特に強い後者の課題を有する原子力エレクトロニクスの研究開発を進めるに当たり，必要な課題を抽出しそれを克服する手段を検討し，併せてその推進方法と目標を考察したものを報告する。これらの検討の上に電子技術総合研究所では平成10年度より新たに「原子力エレクトロニクスのための素子化プロセス技術に関する研究」を開始した。以下では，この研究プロジェクトの展望についても概説する。

KEY WORDS : SiC, 原子力, エレクトロニクス, イオン注入, 耐放射線性評価, 接合プロセス, 伝導性制御 , CVD

§２　原子力エレクトロニクスに課せられた課題

原子力施設や宇宙環境施設で必要とされる高度な安全性を有した機器に必要とされるデバイスには特に環境に対する強い耐性が必要とされ，高温かつ高放射線下でも長期に安定に動作する半導体デバイスの作製と利用が不可欠である。たとえば原子炉においては通常10^3～10^6Gyという高放射線環境や３００℃という高温環境が有り，また宇宙においても10^3 Gyという放射線環境やさらには高エネルギー粒子線の引き起こすシングルイベント反転効果(SEU; Single event upset)というものがある。これらの環境に耐える半導体デバイスには，その材料としてＳｉではその物性値から来る限界（耐放射線性で10^3Gy，温度で２００℃程度が限度）があるため，これに代わる新たな半導体材料が必要である。ここではＳｉＣなどの軽元素半導体がそれに適していることが明らかになっている[1)]　。SiC以外でも，C（ダイヤモンド），BN，GaN，AlN等がやはり候補材料として挙げられる。特に耐放射線性という観点から見ると，SiCは集積線量効果（いわゆるトータルドーズ効果）でＳｉに比べて約２桁放射線耐性があることが判明しており，またＭｅＶ陽子線で発生するフルエンス当たりの一次欠陥濃度はSiに比べSiCは１／3～1/４，ダイヤモンドは1/16であることも明らかになっている[2-4)]。このように原子力エレクトロニクスのデバイス技術を支えるのに極めて優れた特性を有しているのが軽元素半導体材料である。

これらの半導体材料を利用して素子化を進めるための材料基礎技術として電子技術総合研究所においては本彙報に掲載されたように特にＳｉＣを中心とした研究開発を推進してきた。次の大きな課題である素子化のためには，この材料特有のプロセス技術の開発が必要である。この研究開発を推進するためには，**図１**に示すように，軽元素半導体をベースにしたプロセス技術の開発を通して耐放射線性半導体デバイスの開発への道筋をつけることが必要である。また素子化プロセス技術の開発のためには，プロセス技術の開発だけでなく，素子構造形成技術，耐放射線性評価技術の開発が重要であり，これらを相互に密接に研究開発していくことで素子化に向けた展望を切り拓くことができる。その上で原子力エレクトロニクスのキー・テクノロジーである耐放射線半導体デバイスの開発に繋げることができる。

§３　原子力エレクトロニクスの波及効果

一方，原子力エレクトロニクスは上記のように原子力技術に使われるエレクトロニクスと広く定義できるが，ここに使われる半導体は上述のワイドバンドギャップ半導体が中心であり，これらはさらに絶縁破壊電圧が大き

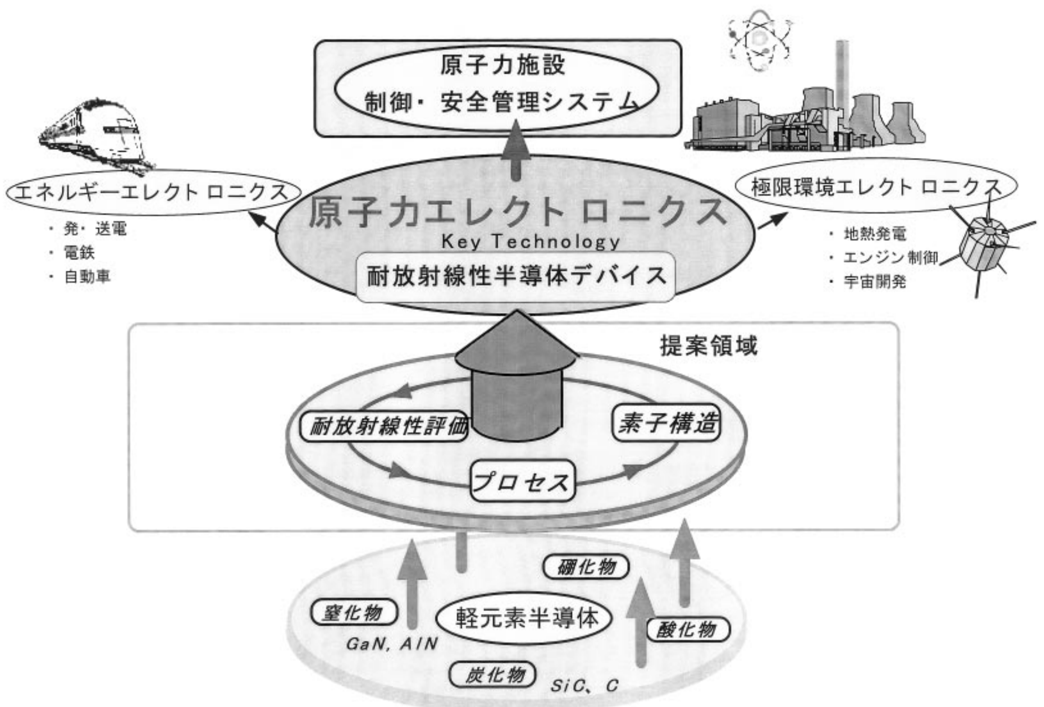

Fig.1　Schematic strategy for the research and development in the device processing for nuclear electronics.

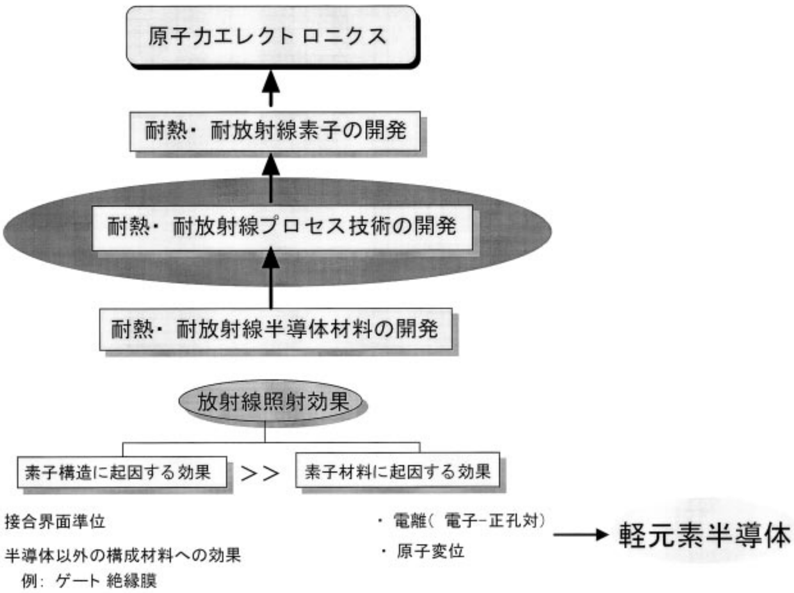

Fig.2 Schematic procedure of the research in radiation-resistant devices.

い，飽和ドリフト速度が大きい，熱伝導率が大きいなどの優れた特性を有している。たとえばSiC，GaN，ダイヤモンドなどはいずれもSiに比べてバンドギャップE_g，絶縁破壊電界E_B，飽和電子ドリフト速度V_s，熱伝導度κが大きく，これらの物性定数を組み合わせた性能指数（Johnson指数，Key指数など）は，これらのワイドギャップ半導体がSiに比べていずれも大きいことを示している[5)]。これらの特性のために電力の発電や送電の制御，電車・自動車等輸送手段の制御に役に立つパワーエレクトロニクス（エネルギー・エレクトロニクス）への利用も期待されている。また下記に述べるように高温での動作が可能なため集積度の向上も期待でき，さらには高周波特性にも優れるため情報エレクトロニクスへの応用も期待されている。パワーエレクトロニクスへの応用に関しては，詳しい解説である本彙報の「ワイドギャップ半導体による高パワーデバイス特性の向上」[5)]を参照されたい。

また，高温ではpn接合の漏れ電流の増加や，真性半導体領域になるためキャリア濃度制御が不可能になるなど，やはりSiでは対応できない問題点あり，SiCなどのワイドギャップ半導体が優位性を発揮することができる。原子力エレクトロニクス用に開発されるデバイスはこのように高温での動作が可能なため，自動車や航空機のエンジン，高温炉，石油探査・ 地熱探査用施設，惑星探査機など高温過酷環境で利用される極限環境エレクトロニクスでの利用も期待される。

§4　原子力エレクトロニクスのための素子化プロセス技術

放射線効果に関しては，すでに材料において軽元素半導体が優れていることを述べたが，それは主としてワイドギャップ半導体であるがために電離（電子−正孔対形成）に要するエネルギーが高く反応断面積が小さいこと，原子間のボンディングが強く原子変位生成が起こりにくいことに起因する。一方，デバイスとして利用するに当たっては，このような材料としての本質的な耐放射

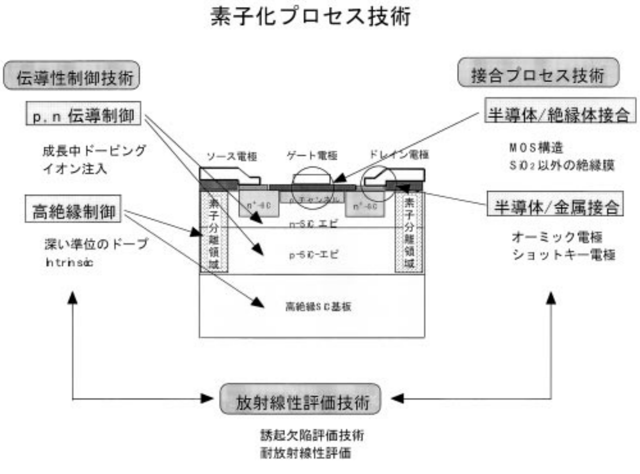

Fig.3 Schematic diagram of individual research subjects and their relations in the device processing project.

線効果に加えて，あるいはそれ以上に素子構造に起因する効果が大きい。例えば**図２**に示す様に素子構造によっては接合界面準位が形成されたり，ゲート絶縁膜に電荷が蓄積されるなど半導体以外の構成材料に起因する効果が耐放射線性を特徴づける。このため前述のように，素子構造形成プロセスが重要な役割を有しているとする所以である。

ここでは具体的な問題点として，ＳｉＣを対象に（１）接合プロセス技術，（２）伝導性制御技術，（３）耐放射線性評価技術についてそれぞれ解決すべき課題を挙げる（**図３**参照）。まず接合特性が耐放射線性に重要な要素であるが，このような耐放射線性を有する接合プロセス技術においては，デバイスとして利用する際に必要なｐｎ接合，半導体・金属接合，半導体・絶縁体接合のプロセス技術が重要である。特に基本的なダイオード形成や電極形成において必要な特性の優れたショットキー接合やオーミック接合のための半導体／金属接合の形成技術，ＭＯＳ構造を作成するために必要な半導体/絶縁体接合形成技術が必要である。ここではＡｌＮのような酸化膜以外の絶縁膜の形成も視野に入れておく必要がある。

また伝導性制御技術については，ＳｉＣにおいて不純物制御の方法が未確立な点に着目し，ｐ型，ｎ型制御技術の確立を目指すのが肝要である。ＣＶＤ（化学的気相成長）法における成長中ドーピング制御やイオン注入によるポストプロセス技術の確立が望まれている。特にＳｉＣの場合ｐ型不純物制御の方法が問題であり，Ｂ，Ａｌ，Ｇａなどが候補に挙げられているものの不純物準位の問題や照射損傷回復のための高温アニーリングの必要性を克服するための技術開発が必要である。また残留キャリア濃度が高いためにまだ実現できていない高絶縁性制御のための深い準位の制御やintrinsicで高絶縁性基板を実現することも必要である。

さらに耐放射線性評価技術では，イオン注入に伴う誘起欠陥評価技術や放射線照射に伴う耐放射線性評価を素子構造に起因する要因を抽出して評価する方法の確立が必要とされている。

§５　具体的アプローチの方法

上記課題を解決するために，本プロジェクトでは以下の具体的アプローチの方法を展開することを念頭において研究展開を図る予定である。

（１）接合プロセス技術においては，まず良好な特性の接合形成を行う前段階として，接合プロセス制御のためにＳｉＣ表面の反応過程を正確に観察し評価することが大切である。そのための観測・評価技術の開発を第一に位置づける。また，ＭＯＳ構造形成に必要な酸化層形成等絶縁層形成のために必要なＳｉＣ表面の酸化過程の詳細な観測・評価技術の開発が必要である。従来より当所では，高品質SiC薄膜に関してその作製技術や関連する反応解析を行って来ており[6,7]，これらの知見を基に接合プロセス技術においても関連する観測･評価技術を開発する。具体的にはＣＶＤでＳｉＣを形成した後酸化する過程のその場観察する技術の開発が必要である。次の研究フェイズでは，これらの酸化過程観測・評価の知見を基に，その制御技術を開発することを位置づける。特に酸化過程においてはその酸化の方法によって耐放射線性に大きな相違があることが判明しており（**図４**参照），良好な絶縁膜作成技術に加えて耐放射線性により有効な絶縁層形成のための技術開発が必要である。

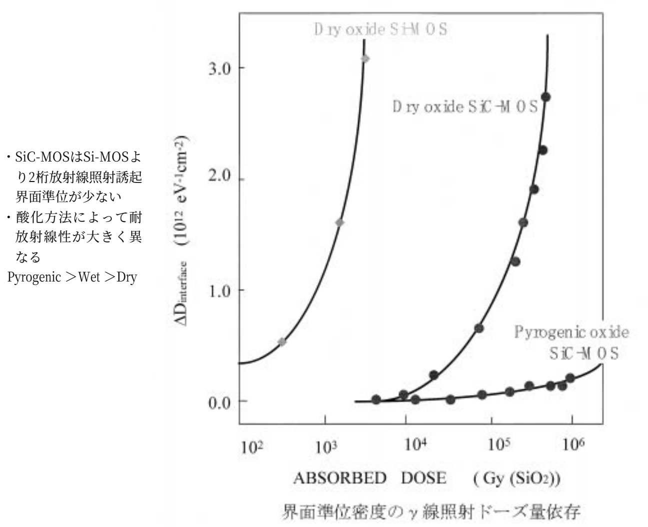

Fig.4 The influence of oxidation method in SiC-MOS devices on the density of the radiation-induced interface energy level.

（２）伝導性制御技術においては,すでに各種 p型ドーパント(Al，Ga，Sc)用イオンの注入による残留欠陥構造の評価や電気特性評価の知見を踏まえて[8-10]，ポストドーピングプロセスにより導入された不純物注入に起因する欠陥の詳細評価およびキャリア誘起過程を詳細に観測・評価する技術を開発するとともにCVDプロセスでのその場ドーピングについてもその効果を観測評価する技術を開発する。次の段階として，効果的な伝導性制御プロセスの開発，特にポストプロセスにおいてはプロセス温度の低温化，耐放射線性素子として有利な高ドーズ注入が利用可能な伝導性制御技術の開発を行うことを視野に入れている。

（３）放射線誘起欠陥評価技術の開発においては，従来では不完全であった評価法に新たな技術開発を加えてより詳細でかつ素子形成へのダイナミックなフィードバックが可能な評価法の開発が必要である。具体的には本研

究に先立つテーマですでに基本的開発を終えたIBIC（イオンビーム誘起電流測定）法をSiCの基本構造素子（ショットキー接合素子など）に適用し，放射線照射のダイナミックな効果を測定する[11-16]。また同時にEBIC（電子ビーム誘起電流測定）法の活用も行う。さらに当所では世界的にもユニークな装置として高強度超低速陽電子物性評価装置を開発しており，これを活用してSiCにおける残留欠陥構造の評価を進めていく[17]。これらを踏まえ，さらに日本原子力研究所との共同研究における成果を基に[18-23]，次の段階では上記（1）接合プロセス技術，（2）伝導性制御技術の研究で開発された各種プロセスを利用した素子構造についてその耐放射線性を評価する技術を確立することを目標とする。

以上の研究を踏まえて，原子力エレクトロニクスのための素子化プロセス技術の開発を総合的に推進できるものと期待している。

§6　おわりに

当所においては，ＳｉＣを中心とする耐環境半導体の材料開発，評価技術の研究開発には我が国においては勿論のこと世界的に見ても早い時期から研究開発に取り組んできた。過去の開発の経緯としては，次世代産業基盤技術研究開発制度の中において「耐環境強化素子の研究開発」（昭和57年度～昭和60年度）を推進しSiCの結晶成長技術やSi，GaAs素子の耐放射線性・耐熱性評価の研究開発を行い，原子力特別研究「耐放射線半導体開発の基盤技術に関する研究」（昭和6３年度～平成4年度），原子力特別研究「耐熱・耐放射線半導体素子のための材料基礎技術に関する研究」（平成5年度～平成9年度）において基礎的なＳｉＣの材料作製技術の確立，放射線評価手法の確立を行った。このように本研究開発は国立研究所における長期の研究開発を通してその推進が可能になったものである。現在特にＳｉＣのパワーデバイスへの応用を主眼にしたニューサンシャイン計画における新たな研究開発「超低損失電力素子技術の研究開発」が開始されている。これはSiC，GaN，ダイヤモンド等ワイドギャップ半導体の有する優れた特性を利用してそれを用いた素子開発を行うことにより高電圧・大電流・高速の電力制御が必要とされるパワーエレクトロニクスの新展開を図ることを目的としている。一方，原子力エレクトロニクスの研究開発においてはこれらの半導体材料を高温，高放射線下という過酷な環境で利用するための素子プロセス開発を主眼にしており，両研究開発は相俟って既存のＳｉを中心にしたエレクトロニクスでは対応できない今後の新たなニーズに適合するデバイス技術の研究開発を推進することになる。

平成10年度より新たに推進している「原子力エレクトロニクスのための素子化プロセス技術に関する研究」では本稿で述べた研究開発を進めていく。本研究の推進に当たり関係各位のご支援をお願いする次第である。

参　考　文　献

1) 吉田貞史；パリティ**11**(1995) 25.
2) A.L. Barry, B. Lehmann, D. Fritsch, D. Braeunig; IEEE Trans. on Nuclear Science **38** (1991) 1111.
3) J.M. McGarrity, F.B. McLean, W.M. DeLancey, J. Palmour, C. Carter, J. Edmond and R.E. Oakley; IEEE Trans. on Nuclear Science **39** (1992) 1774.
4) 吉川正人，大島武，伊藤久義，梨山勇，高橋芳宏，大西一功，奥村元，吉田貞史；電子技術総合研究所彙報 (1999)（本彙報特集号のページ）.
5) 吉田貞史；電子技術総合研究所彙報 (1999)（本彙報特集号のページ）.
6) I.Ishida, T.Takahashi, H.Okumura, S.Yoshida, T.Sekigawa ；Jpn. J. Appl. Phys, **36** (1997) 6633.
7) L.S.Hong, S.Misawa, H.Okumura, S.Yoshida; Inst. Phys. Conf. Ser. **137** (1994) 239 .
8) Y. Tanaka, N. Kobayashi, M. Hasegawa, S. Yoshida, Y. Ishida, T. Nishijima, H. Sekiguchi, N. Hayashi, K. Oyoshi and S. Hishita; Proceedings of 15th Symposium on Materials Science and Engineering Research Center of Ion Beam Technology (1996) 45-49 .
9) Y. Tanaka, N. Kobayashi, M. Hasegawa, S. Yoshida, Y. Ishida, N. Hayashi, H. Tanoue; Proceedings of International Conference on Silicon Carbide, III-nitrides and Related Materials-1997 Part2 (1998) 713.
10) T.Henkel,Y.Tanaka, N. Kobayashi, I. Koutzarov, H, Okumura, S, Yoshida and T, Ohshima;MRS Symp. Proc. **512** (1998) 163.
11) Nashiyama, T. Hirao, T. Kamiya, H. Yutou, T. Nishijima, H. Sekiguchi； IEEE Trans. Nucl. Sci. NS **40**, No.6 (1993) 1935-1940.
12) T. Nishijima, H. Sekiguchi, S. Matsuda, S. Takeuchi, N. Shiono, H.Anayama, A. Morio； Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. **B 104** (1995) 528-532.
13) H. Sekiguchi, T. Nishijima, I. Nashiyama, T. Misawa, S. Yoshida； Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. **B 104**, (1995) 566-570.
14) 関口弘喜，西島俊二，平尾敏雄，梨山勇；応用物理学会誌 第**65**巻， 第2号(1996) 126-131 .

15) T. Nishijima, H. Sekiguchi, S. Matsuda, N. Shiono: Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. **B130** (1997) 557-563.

16) T. Nishijima, H. Sekiguchi, T. Hirao, I. Nashiyama, N. Nemoto, S. Matsuda, N. Shiono, ；Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. **B130** (1997) 528-533.

17) A.Uedono, H.Itoh, T.Ohshima, R.Suzuki, T. Ohdaira, S. Tanigawa, Y.Aoki, M.Yoshikawa, I.Nashiyama, T. Mikado, H.Okumura, S.Yoshida；Jpn. J. Appl. Phys. **36** (1997) 6650.

18) M.Yoshikawa, H.Morita, H.Itoh, I.Nashiyama, H.Okumura, S.Misawa, S.Yoshida, : Springer Proceedings in Physics **71** (1993) 393 .

19) M.Yoshikawa, H.Itoh, H.Morita, I.Nashiyama, H.Okumura, S.Misawa, S.Yoshida, , Mat.Res.Symp. Proc. **281** (1993) 797

20) H.Itoh, Y.Aoki, M.Yoshikawa, I.Nashiyama, H.Okumura, S.Yoshida；Proc. the 13th Symp. on Materials Science and Eng.,(1995) 75 .

21) H.Itoh, A. Kawasuso, T.Ohshima, M.Yoshikawa, I.Nashiyama, H.Okumura, S.Yoshida,；Proc. 7th Int. Symp. Advanced Nuclear Energy Reserach, "Recent Progress in Accelerator Beam Application" 35, 5986 (1996).

22) M.Yoshikawa, H.Itoh, T. Ohshima, I.Nashiyama, H.Okumura, S.Yoshida；Institute of Physics Conference Series (Silicon Carbide and Related Materials 1995) **142**, (1996) 741.

23) T. Ohshima, M.Yoshikawa, H.Itoh, T. Takahashi H.Okumura, S.Yoshida, I. Nashiyama; Institute of Physics Conference Series (Silicon Carbide and Related Materials 1995) **142** (1996) 801.

(1999. 2.22受付)