



JAEA-Review

2005-006



JP0650152

**研究炉等(JRR-3, JRR-4 and JMTR)を用いた  
中性子核変換ドーピング Si 半導体(NTD-Si)  
製造機能拡充の検討**

Expansion of Neutron-Transmutation-Doped Silicon(NTD-Si)  
Semiconductor Productivity using Research Reactors  
(JRR-3, JRR-4 and JMTR)

NTD技術検討会

Working Group for NTD Technology

東海研究開発センター

原子力科学研究所

Nuclear Science Research Institute  
Tokai Research and Development Center

January 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。  
本レポートの全部または一部を複写・複製・転載する場合は下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課

Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

This report was issued subject to the copyright of Japan Atomic Energy Agency.

Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to :

Intellectual Resources Section,

Intellectual Resources Department

2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN

Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

研究炉等(JRR-3, JRR-4 and JMTR)を用いた  
中性子核変換ドーピング Si 半導体 (NTD-Si) 製造機能拡充の検討

日本原子力研究開発機構東海研究開発センター原子力科学研究所  
NTD 技術検討会

(2005 年 12 月 12 日受理)

中性子核変換ドーピング Si 半導体 (NTD-Si) は高性能の電力制御用半導体素子 (パワーデバイス) への応用が期待され、ハイブリッド車の増産等に伴い、その需要が急激に増大するものと見込まれる。このような需要増大に対応するため、研究炉等 (JRR-3, JRR-4 及び JMTR) による NTD-Si 増産の技術的課題を検討し、以下の方策を提案するに至った。

1. JRR-3 では、Si 照射装置の簡易的な改造で約 2 倍の増産が見込める外部冷却法の検討を優先的に進める。また、Si 照射装置を全自動化する方法を長期的に検討し、約 4 倍の増産を目指す。
2. JRR-4 では、NTD-Si 製造量拡大のため、8 インチ径に止まらず 12 インチ径の Si インゴット照射が可能な照射筒の炉心タンク外への設置を優先的に検討する。
3. JMTR では、8 インチ径及び 6 インチ径用の照射装置を整備して年間約 30 トンの NTD-Si 製造を目指す。

上記の提案を実施した場合、NTD-Si 製造能力を年間約 46 トン (現在の生産能力の約 10 倍) まで高められ、現在の国内需要 (年間約 90 トン) の約 50%までの供給を満たすことが可能となる。

NTD-SiC 半導体を基板とするパワーデバイスは Si デバイスより更なる性能向上が見込めることから、SiC 半導体の NTD 技術については国内の産業界及び研究機関と密接に連携しながら研究開発を進めることが重要である。

Expansion of Neutron-Transmutation-Doped Silicon (NTD-Si) Semiconductor Productivity  
using Research Reactors (JRR-3, JRR-4 and JMTR)

Working Group for NTD Technology

Nuclear Science Research Institute  
Tokai Research and Development Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 12 , 2005)

Neutron-Transmutation-Doped Silicon (NTD-Si) is regarded as a promising semiconductor for power device application. The demand of NTD-Si is expected to be raised significantly due to mass production of hybrid-cars in the near future. In order to meet the demand, we have investigated the expansion technology of the NTD-Si productivity in the research reactors of JRR-3, JRR-4 and JMTR. We have made out the following proposals.

1. In the JRR-3, the external cooling method should be preferentially developed to be twice the productivity of NTD-Si using a modified Si-irradiation facility, at the first step. At the next step, a full-automatic Si-irradiation facility should be installed to increase the NTD-Si productivity four-times.
2. In the JRR-4, the Si-irradiation facility, by which an Si ingot of 8- and 12-inch in diameter can be irradiated with neutrons, should be designed and installed around the reactor core tank.
3. In the JMTR, the Si-irradiation facilities for 8-inch and 6-inch diameter ingots should be developed for producing NTD-Si of approximately 30 ton/year.

By realizing the modifications mentioned-above, the productivity of NTD-Si will increase to approximately 46 ton/year, that is about 10 times as great as the present one, and thus about a half of the present domestic demand of NTD-Si will be covered by processing utilization of the research reactors.

Silicon carbide (SiC) semiconductors doped with the NTD technology are considered suitable for high power devices with superior performances to conventional Si-based devices. It is strongly recommended that R&D of SiC-NTD technology is performed in collaboration with industries and research institutes.

Keywords: Neutron- transmutation-doped Silicon, NTD-Si , Research Reactors, JRR-3, JRR-4, JMTR, Silicon Carbide (SiC), Irradiation Facilities, High-quality Power Device

目次

1. はじめに	1
2. NTD-Si 半導体製造	2
2.1 日本における状況	2
2.2 世界における状況	4
3. NTD-Si 半導体製造拡大の技術的課題	11
3.1 JRR-3 の利用	11
3.2 JRR-4 の利用	21
3.3 JMTR の利用	27
4. NTD-Si 半導体製造拡大に関する産学官の連携で取り組むべき課題	33
4.1 製造コストの低減対策	33
4.2 大口径化・均一化に向けた照射技術の高度化	35
4.3 安定供給のための国内外の体制	39
5. NTD法による SiC 半導体製造技術の課題	41
5.1 SiC 半導体の特長と応用分野	41
5.2 NTD 技術の位置付け	41
5.3 技術開発の現状と課題	42
5.4 今後の展望	43
5.5 産学官及び原子力機構内の開発体制	44
6. おわりに	55
謝辞	56

Contents

1. Introduction	1
2. NTD-Si-semiconductor production	2
2.1 Situation in Japan	2
2.2 Situation in World	4
3. Technical assignments for increase in NTD-Si-semiconductor Production	11
3.1 Utilization of JRR-3	11
3.2 Utilization of JRR-4	21
3.3 Utilization of JMTR	27
4. Assignments to be solved through cooperation with industries and institutions	33
4.1 Reduction in production cost	33
4.2 Sophistication of irradiation techniques toward enlargement of crystal diameters and homogenization	35
4.3 Domestic structures for stable supply	39
5. Assignments of NTD-SiC-semiconductors	41
5.1 Applications and advantages of SiC-semiconductor	41
5.2 State of NTD-SiC technology	41
5.3 Present status and assignments of technology development	42
5.4 Future percepts	43
5.5 Cooperation with industries and institutions	44
6. Conclusions	55
Acknowledgments	56

## NTD技術検討会

### ○検討会メンバー

- 山下清信：研究炉加速器管理部 次長
- 和田 茂：研究炉加速器管理部 研究炉利用課 課長代理
- 市村茂樹：研究炉加速器管理部 研究炉利用課 技術副主幹
- 石塚悦男：材料試験炉部 研究主幹
- 伊藤久義：量子ビーム応用研究部門 環境・産業応用研究開発ユニット長
- 河村 弘：経営企画部 次長
- 新見素二：材料試験炉部 次長
- 石原正博：経営企画部 調査役
- 一色正彦：放射線利用振興協会 専務

### ○オブザーバー

- 田中俊一：日本原子力研究開発機構 特別顧問
- 横溝英明：原子力科学研究所 所長
- 田島保英：産学連携推進部 部長

This is a blank page.

## 1. はじめに

半導体素子の基板となるn型のシリコン(Si)基板は、CZ(Czochralski)法と呼ばれる製造過程でリン(P)などを拡散法で添加する。しかし、拡散法などの従来法はSiインゴットの半径方向にP濃度のムラが生じて抵抗率の変動を大きくする。これが半導体素子の耐圧性や電気特性の低下、あるいは素子破壊と言った不具合をもたらす要因となる。この抵抗率が不均一となる問題を解決したのが、中性子による核反応 $^{30}\text{Si}(n,\gamma)^{31}\text{Si}\rightarrow^{31}\text{P}$ を利用する中性子核変換ドーピング(Neutron Transmutation Doping: NTD)法である。

日本原子力研究開発機構(原子力機構)の研究炉(JRR-3及びJRR-4)においてNTD法による半導体ドーピングのサービスを実施しているが、国内の需要(推定、90t)と比べると極めて能力が乏しい状況にあり、NTD機能を拡充してもらいたいとの産業界からの要望がある。特に、ハイブリッド電気自動車、燃料電池自動車での制御用インバータデバイス搭載、電気鉄道車両のインバータ制御車両への転換等により、パワーエレクトロニクス的大幅な発展が期待されており、SiやSiC半導体に対する需要が急速に伸びると予測されている。

現在、JRR-3及びJRR-4で照射しているSiはそれぞれ年間約3.9及び約0.7t程度で、合わせても国内需要の5%程度に過ぎない。加えて、JRR-3で照射できるのは最大6インチ直径のSiインゴットであるが、現実には8インチ直径のものが主流になりつつあり、国内半導体メーカーは韓国やオーストラリアにNTD-Siの製造を依頼しているという実態がある。

将来の高性能半導体として最も注目されているのはSiC半導体である。SiC半導体はSi半導体と比べて、高耐圧、高温耐性、耐放射線性など本質的に優れた特性を有している。しかし、SiCは結晶成長技術の難しさの他にドーピング濃度の均一化が課題である。NTD法は、Si半導体の実績に見られるように、SiCについてもドーピング濃度の均一化、濃度制御などの面で優れており研究炉の活用が期待できる。

日本原子力研究所(原研)は、核燃料サイクル開発機構と統合し、この2005年10月1日から独立行政法人日本原子力研究開発機構(原子力機構)となり、独自の事業収入を増やすことが強く求められている。材料試験炉(JMTR)についても、改造するか否かについては今後、国のレベルでの議論に委ねられることになるが、JMTRの改造を実現するためにも、国外と競争できるSi、SiC半導体製造を担えるようなNTD設備を整備することが極めて重要であると考えられる。

以上のことから、機構でのJRR-3、JRR-4及びJMTR(総称して、「研究炉等」と呼ぶ)を活用したNTDサービス業務の将来についての調査・検討を進め、必要な対応を具体化した。

## 2. NTD-Si 半導体製造

### 2.1 日本における状況

#### (1) 原子力機構における NTD-Si 照射の草創

デンマークの Si 製造メーカー(トプシル社)が、DR-2 炉を用いて 1974 年に世界で初めて NTD-Si の実用照射をおこなった。同じ年、西独のワッカー社でも英国のハーウエル研究所と組んで NTD-Si の生産に乗り出し、日本のデバイスメーカーへの売り込みを開始した。一方、米国においてもモンサント社がミズリー大学の MURR 研究炉を使って生産準備を進めていた。勿論、国内 Si 製造メーカーも海外メーカーに対抗して NTD-Si 製造の実施計画を進めていた。西独から帰国した国内 Si メーカーの研究者が原子力機構に相談に訪れたのが発端となり、原子力機構の研究炉における NTD-Si 照射の検討が始まった。国内 Si メーカーの相談の背景には、やがて NTD-Si が世界に広まった場合に、日本のメーカーは海外炉から締め出しを受けるであろうとの危惧があった。

当時、運転中に試料交換が可能な JRR-2 は炉心構造体の改修中にあったことから受け入れは極めて難しい状況にあったが、それでも旧日本原子力研究所はこの提案に積極的に対応し、旧研究炉管理部を中心に調査検討を進め、翌 1975 年 3 月 JRR-4 を用いた予備試験を実施した。

この結果を受け、同年 12 月原子力機構は国内 Si メーカーをメンバーとする(社)新金属協会から「中性子照射によるシリコン単結晶への  $^{31}\text{P}$ ドーピングに関する調査」業務を受託した。当時の Si メーカーは、大阪チタニウム製造、小松電子金属、信越半導体、東洋シリコンおよび日本電子金属の 5 社であった。

原子力機構は JRR-4 に照射筒(D パイプ)を整備し、抵抗率分布の均一性と目標抵抗率の的中率を中心に 27 体の Si ロッドを用いて試験照射を実施し、1976 年 8 月に報告書をまとめた。その結果、NTD-Si に対するメーカーの要求仕様を十分達成できることが確認され、技術的見通しが得られたことから早速原子力機構は同年 10 月に「シリコンドーピングアドホック委員会」(委員長:橋理事)を設置した。この委員会では、時に応じ科学技術庁との協議も交え①照射筒(L パイプ)の増設 ②「事業の認可」の取得 ③事業実施主体について検討を行った。その結果、事業実施主体には、原子力機構がなり得ぬことから、すでに高崎地区にてガンマ線の照射事業を実施している(財)放射線照射振興協会(放射線利用振興協会の前身、以後「放振協」と略す)がこれを引き受けることとなった。

#### (2) 原子力機構における設備対応と照射実績

原子力機構の研究炉における照射実績の推移を第 2.1-1 図に示す。1977 年 8 月には科学技術庁、原子力機構、メーカー、協会相互間の取り決め手続きが全て完了し、

原子力機構は、JRR-4 の D パイプを用いた NTD-Si の実用照射を開始した。当初のロッドサイズは、直径最大 66mm(約 2.5 インチ径)、長さ最長 300mm であった。1978 年 1 月には JRR-4 に直径 105mm(約 4 インチ径)までの照射が可能な L パイプの設備が増設された。1975 年代は、各照射孔とも、その利用率はほぼ 100%という好調な状況が続き、両照射孔を合わせ総照射量は毎年約 1トンに達した。なお、D パイプを用いた 2.5 インチ径ロッド照射は、メーカーの大口径化に向けた合理化策を受け、1985 年を境に減少しはじめ 1991 年で需要は全くなかった。

一方、1983 年には JRR-2 の VT-9 照射孔に NTD-Si 照射設備が設置された。ロッド径は最大 78mm(約 3 インチ径)であるが、運転中に 15 本までの照射 Si の自動交換ができるように設計されていた。この増設により年間総照射量は向上し、翌 1984 年には約 1.8 トンを達成した。しかし、その後 JRR-4 の D パイプと同じ運命をたどり需要は急減した。そこで Si ロッドの大口径化の動向に即し、1996 年に老朽化の進む JRR-2 の代替炉として改造した JRR-3 に 6 インチ径 SI 孔設備(ロッド最長 600mm)を、また、2001 年には JRR-4 改造工事の機会に 5 インチ径 N パイプ(ロッド最長 400mm)が設置され、両炉併せて年間約 4.5 トンの供給体制が整った。

これまでの照射実績の推移には、設備側の供給能力のほか、為替や経済変動等の外部的影響を色濃く反映している。バブル経済の崩壊と共に経済不況が年を追う毎に深刻化するにつれ、産業界において経費の見直しと合理化が進められ、Si メーカーも例外ではなかった。そもそもは、海外炉から照射利用について制限を受けるかもしれないとの危機感から少々割高であってもとの思いから研究炉の利用がスタートした。しかし、スタートしてみると海外の Si メーカーの需要は伸びず、海外炉は自己収入のため日本の Si メーカーを最大顧客とする積極的な展開に転じた。海外炉に比べ割高なわが国のシリコン照射料金は、折からの円高も相まってますます割高感が強まり、このため次第に原子力機構の研究炉を使った NTD-Si 照射が敬遠されるようになった。特に平成に入り円高ドル安の傾向は加速的に進み、1995 年には 1ドル 90 円を割り込む状態に至り、価格的に海外炉に太刀打ちできないことから放振協の NTD-Si 事業の撤退が検討された時期がある。しかし、原子力機構による共同利用料金の見直しと放振協の人員削減等の合理化により海外照射料金に近づけることで需要を確保し事業廃止の危機を一旦乗り切った。

Si 照射開始当時、1 グラム約 100 円であった照射料金は円高ドル安の影響(為替相場 1ドル 330 円から 140 円台に変動)により一挙に 30 円に削減、加えて半導体コストの国際競争下にあって以後毎年恒例のごとく照射料金の変更が求められ、2004 年現在 1 グラム 15 円台を余儀なくされている。第 2.1-2 図にわが国の照射料金の推移を示す。

### (3) 原子力機構の研究炉における現状

現在、国内の2社が原子力機構の研究炉を利用している。しかし、利用する照射料金が1グラム15円台まで下げられたとはいえ、まだ海外炉の平均水準に比べると約5割高であり、さらに海外炉のように複数炉の連携体制が整備されてなく年間を通じた安定供給が望めないこと理由から、1社は、あくまでも海外炉の補完的な位置づけとして原子力機構の研究炉を利用するとしている。また、他の1社は、海外炉で対応できないような急なデバイスメーカーからの注文が発生した場合の緊急的な利用に止まっている。2004年度の2社からの照射依頼は、合わせて約4.6トンであった。

## 2.2 世界における状況

### (1) NTD-Si 照射を実施する海外炉

NTD-Si 照射を実施する世界の研究炉を第 2.2-1 図に示す。この図から世界の主要研究炉と目される施設の多くが、NTD-Si 照射を実施していることが分かる。稼働中の研究炉で NTD-Si 照射を手がけていない国として、カナダの名が挙げられる。NRX 炉やその代替炉 MAPLE 炉はラジオアイソトープ生産専用炉として活用する方針のようである。ドイツも今のところ NTD-Si 照射を実施していないが、ミュンヘン大学に新設された FRM-II がまもなく NTD-Si 市場に参入予定と伝えられている。

海外炉の主要諸元や NTD-Si 照射孔の情報等は IAEA や各施設のホームページから容易に知ることができるが、NTD-Si 照射の実績を知ることは極めて困難である。これは、半導体産業に関わる各社の生産高などの情報は、国際競争下にあつて高度の企業秘密にあたることから、関係機関に守秘義務が課せられているためである。従って、種々の間接的な手段によって得た細切れデータを集めて、最終的に世界全体の製造量を推定することになる。このような過程を経て得た 2004 年度の世界の NTD-Si 総生産量は、約 160 トン(推定)である。内訳を第 2.2-2 図に示す。図にロシアの研究炉が示されていないのは、照射実績データを全く入手できないためである。昨年、放振協が行った中国の現地調査において、年間 50 トンを超える中国国内の需要に対し、HWRR-II、MJTR、HFETR の3研究炉で年間約 30 トンを賄っている。不足分はロシアの研究炉を利用していると見込まれる。

### (2) 日本国内 Si メーカーと海外炉

世界の NTD-Si 総生産量約 160 トンから中国内需向け 30 トンを差し引いた残り 130 トン、これの 7 割に相当する約 90 トンが、日本国内 Si メーカーからの照射依頼によるものである。メーカーは、信越半導体、SUMCO(旧三菱住友シリコン)、コマツ電子、東芝社等と見込まれる。原子力機構の研究炉の国内 Si メーカー全体に対する貢献度は約 5%にあたる。

在来のドーピング法と異なり、NTD 法はエネルギーの高い速中性子やガンマ線の存在による Si 単結晶中の格子欠陥を熱処理(アニーリング)によって回復させる作業

工程が必要となる。重水炉であれば照射場の中性子は十分熱化されているので熱処理工程も簡単であるが、熱中性子が十分に熱化されていない(Cd 比が小さい)軽水炉の場合は、照射後、熱処理にかなり時間がかかる。国内 Si メーカーのうち軽水炉の使用を受け入れているところは、今のところ1社である。

### (3) 今後の需要動向

国内 Si メーカーの NTD-Si 半導体の年間総生産量は、2004 年度約 90 トンである。2005 年度はその 5 割増加が見込まれている。さらに 2006 年度も同様の需要増加が期待されている。近年、資源の有効利用化に向けた電気エネルギーへの関心の高まりを背景に、電力変換損失の低減化や高速動作化に対応した電力制御用半導体素子の需要が急速な伸びを示している。その代表的用途が、高速車両やハイブリッド車などの車載用である。原油価格の高騰と環境対応を受けハイブリッド車等の需要はますます高まるものと予想される。自動車メーカーが発表するハイブリッド車の製造計画と NTD-Si の需要動向が符合するところである。

問題は、250 トンを超えるまでに増加する需要に対し、これを上回る受け皿が、世界の研究炉の処理能力の増大により 2007 年度までにできあがっているかである。現在、中国原子能研究院(CIAE)の CARR 炉(炉出力 60MW)とオーストラリア ANSTO 研究所の OPAL 炉(炉出力 20MW)の 2 基の研究炉が建設中であり、共に年間 40 トンの照射容量を有している。さらに、ドイツの FRM-II の新規参入と韓国 HANARO 炉の 8 インチ径照射設備の増設計画があり、共に高々 15 トンと推測する。これに対し、スウェーデンの R2 とオーストラリアの HFAIR の 2 基の廃炉により、両炉併せて約 30 トンの低下となる。従って、2007 年度までに全ての計画が順調に遂行できれば 250 トンを超えることが可能であるが、Si ロッド径が全て 8 インチに淘汰された場合を想定すると、8 インチ径ロッドの照射が可能な研究炉は、CARR、OPAL、HANARO の 3 基のみに限定されるため、合計の照射容量は 100 トン不足であり需要を満たすことが困難となる。

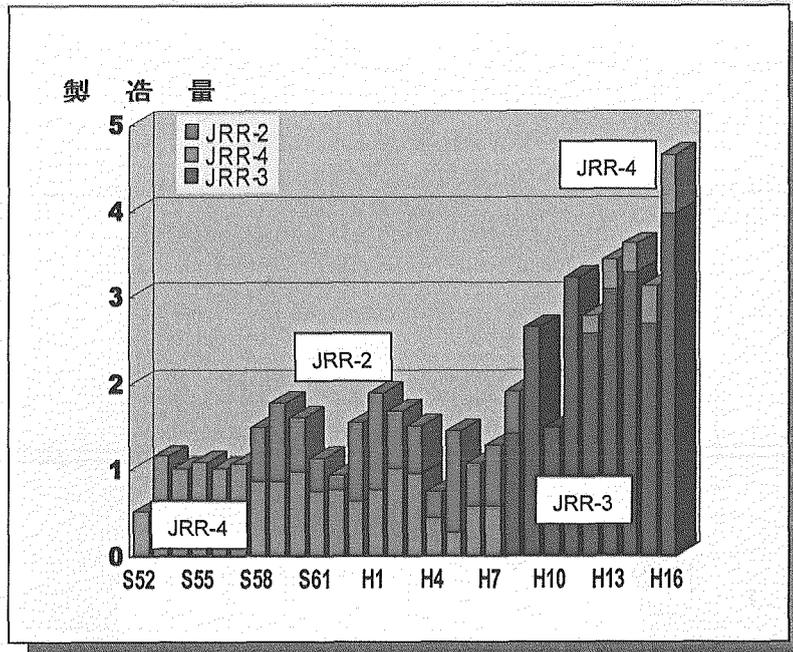
### (4) デバイスメーカーの企業姿勢と対応

産業界の製品化のための材料の物流は、トヨタ看板方式に代表されるように Just in Time 方式を採用し、在庫を持たないが短期の需要に即時対応できる仕組みが求められている。従って、需要が発生してから Si ウエハが納入されるまでの Turn Around Time が短くなりつつある。このことは地の利を得た国内炉にとって有利な状況となる。

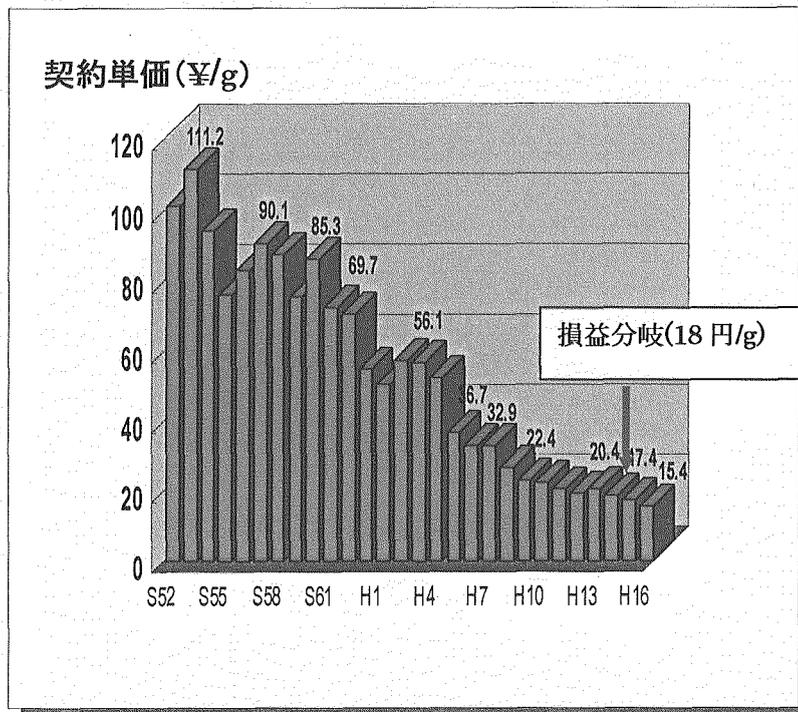
NTD-Si を用いた半導体素子の製造ライン等の更新に関しては、投資した設備の元が取れたかが重要な判断基準となり、その Life Time は約 5 年ぐらいが想定されている。現在製造ラインとしては 6 インチ径ウエハが主流であるが、次の 2006 年または 2007 年頃が転機にあたり、これを契機に 8 インチ径ウエハラインがこれに取って代わる

と言われている。このことから NTD-Si 産業へ本格的に参加し、勝ち残るためには、8 インチ照射装置の設置が必須条件と考えられる。

NTD-Si の最大の対抗馬は、原子炉を使わないエピタキシャル Si ウエハである、こちらも現状 6 インチ径ラインが主流であり、NTD-Si とは競合状況にある。しかし、デバイスメーカーは次の 8 インチ径ラインの設備投資計画を前に、NTD 路線でいくか、あるいはエピタキシャル路線を採るかの選択を強いられると見込まれる。品質的には NTD 製品が高いが、Just in Time 方式に即し、年間を通して安定な NTD-Si の供給が実現できるかが争点である。2005 年度前半、JRR-3 と JRR-4 を併せて 7 回の計画外停止が生じ供給できない状態が相次ぎ、その結果 NTD-Si 路線に対するメーカー側の判断がぐらつき始めている。改めて信用回復に向けた取組が急がれている。

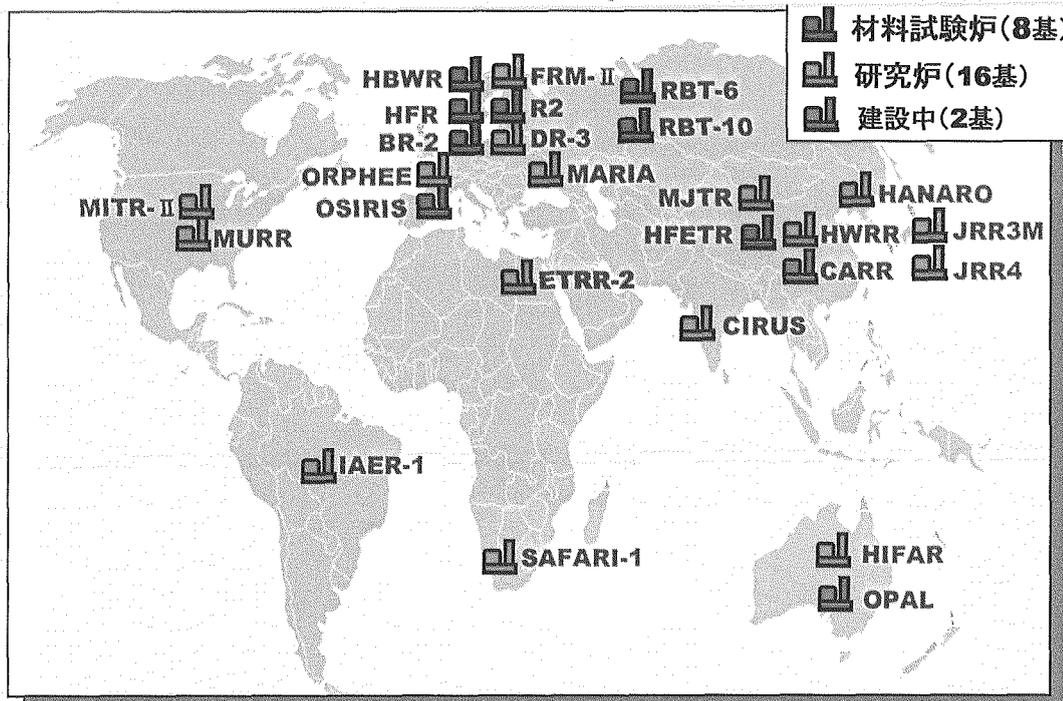


第 2.1-1 図 原子力機構の研究炉における Si 半導体の照射実績の推移

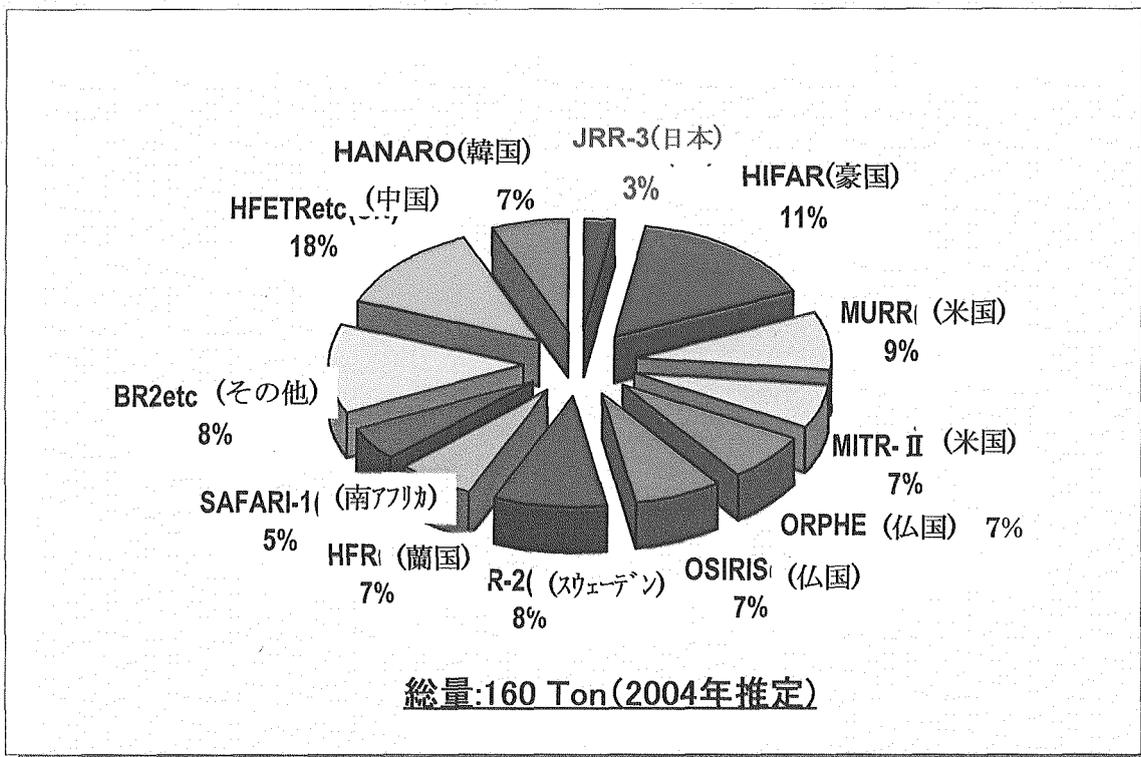


第 2.1-2 図 わが国の Si 半導体の照射料金の推移

This is a blank page.



第 2.2-1 図 NTD-Si 照射に対応する世界における研究炉



第 2.2-2 図 世界の研究炉における NTD-Si の生産率

This is a blank page.

### 3. NTD-Si 半導体製造拡大の技術的課題

#### 3.1 JRR-3の利用

JRR-3におけるNTD法を用いたSi照射は、均一照射設備を用いて重水タンク内のSI-1孔で行っている。均一照射設備の概略及び炉心の水平断面を第3.1-1図、第3.1-2図に示す。均一照射設備は、装荷用キャスク(以下、「Si照射装置」という。)、ホルダ、案内管等から構成され、主としてSi単結晶を照射するために設置したものである。

Siインゴット(以下、「Si」という。)は、原子炉プール頂部に設置したSi照射装置から重水タンクに据付けた照射筒に試料を降ろし、重水反射体領域の原子炉燃料中心高さ付近で、径方向の中性子分布を均一にするため試料を回転させながら最大約6時間の照射を行う。その後、Si照射装置内で約42時間の放射能減衰を行い、中性子照射による軸方向分布を均一化するためSiを反転させ再照射を行う。Siは、外径161mm、長さ740mmのアルミニウム製ホルダに収納され、最大直径6インチまで照射が行えるようになっている。

NTD-Si増産及びコスト低減のためには、Si照射装置で約42時間Si及びホルダの放射能を減衰させているが、これを短縮する方法、他の照射孔を有効活用する方法及び均一照射設備の改造等を行う方法がある。

#### (1) 放射能減衰のための待ち時間を短縮する2通りの方法

##### ① 外部冷却法

照射したSiはSi照射装置から遮へい体付きホルダに収納し、外付けのコンテナに移動する。ただちに未照射SiをSi照射装置に装荷する。これまでの減衰時間は他のSiの照射に当てる(以下、「外部冷却法」という)。概念を第3.1-3図に示す。また、遮へい体付きホルダで約42時間減衰を行ったSiについては、反転し再度炉内で照射を行う。この外部冷却法により現状の約1.8倍の増産が可能となる。課題は、照射後のSiをコンテナ内で冷却させるため、照射試料の線量及び核種分析を行い、遮へい体付きホルダ及びコンテナを新たに製作しなければならない点である。

##### ② フィルター法及びシャドウ方法

NTD-Si法では、1度照射したSiを軸方向の照射分布を均一化するため反転し再度照射している。軸方向の中性子束分布が均一にできれば、「照射」・「冷却」・「反転」・「照射」・「冷却」の工程の内「反転」以降の作業を省略できる。Siに当てる中性子束を均一するためには、ホルダに中性子吸収体を組み込む方法(以下、「フィルター法」という。)とホルダとSi照射筒の間隙部に中性子吸収材を設置する方法(以下、「シャドウ方法」という。)があり、各々の概念を第3.1-4図及び第3.1-5図に示す。これらの方法は、一番低い中性子束に合わせるように

高い部分を遮蔽して照射しなければならないため、照射時間が長くなる欠点があるが、「反転」・「照射」・「冷却」の工程が省略できるため、現状の約 1.5 の増産が可能である。これらの方法の実現のためには、照射ホルダの材質変更若しくは中性子吸収体の混入及び構造等を定めるため、中性子束の分布計算、特性試験並びに試料を用いた照射試験を行う必要がある。

## (2) 5インチ DR-1 孔の活用

他の照射孔を有効活用する方法としては、重水タンク内の回転照射設備 (DR-1 孔) により Si 照射を行う方法が考えられる (第 3.1-2 図参照)。この照射孔は SiC 照射として有望視されているものであり、照射できる Si の大きさは最大 5 インチである。このため、DR 孔による増産は現状の約 1.7 倍である。この Si 照射設備の新設には、約 1 年間の期間と約 1.7 億円のコストを要する。なお、この照射を行うには、設置変更許可申請及び設計及び工事の方法の認可申請 (以下、「設工認」という。) 等を踏まえた上で、DR-1 孔用の Si 照射設備を新設 (新規 Si 照射装置の製作及び既存設備の一部改造等) しなければならない。

## (3) 均一照射設備の改造等を行う 2 つの方法

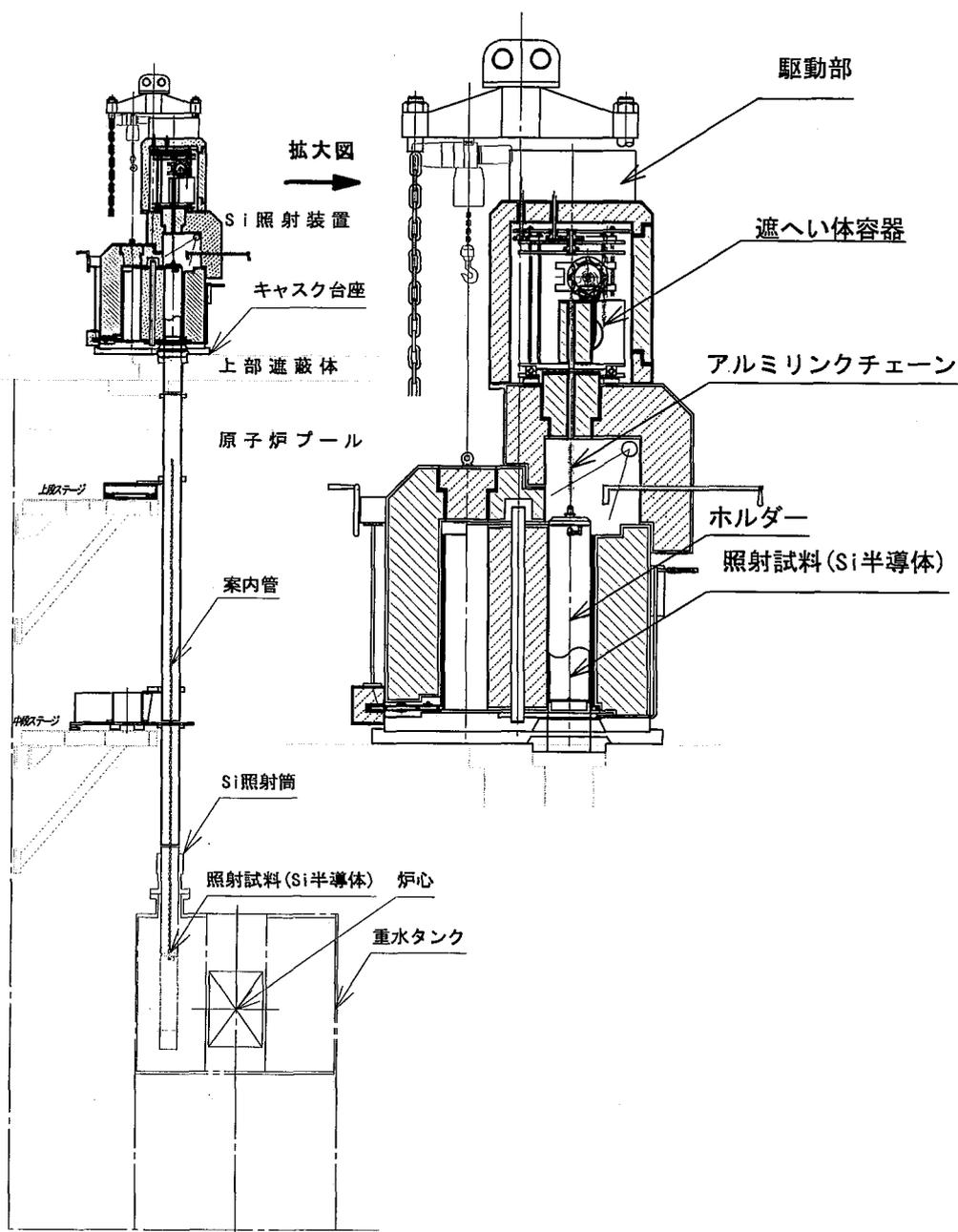
### ① Si 照射装置の全自動化

Si 照射装置を改造することにより、反転作業を機械的に行わせ、「照射」・「冷却」・「反転」・「照射」・「冷却」の工程を「照射」・「反転」・「照射」・「冷却」の流れ作業にする。自動的に Si 照射を行う装置の概略を第 3.1-6 図に示す。これによる増産は休日、夜間の作業をも容易になるため現状の約 4 倍が見込める。この改造では、駆動機構の改造及び遮へい体の増強を行うため、Si 照射装置の設工認等が伴う。

### ② 重水タンクに 8 インチ用照射孔の設置

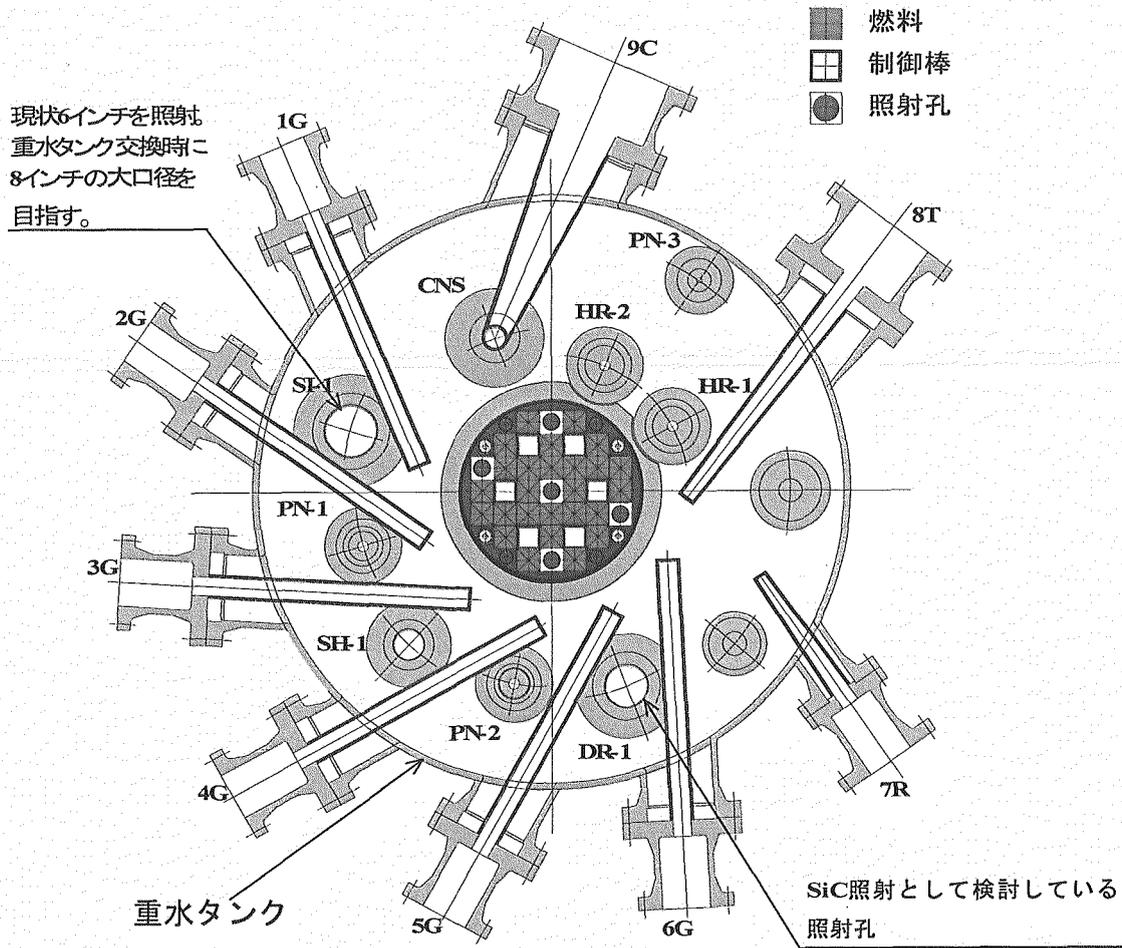
重水タンクの SI-1 孔を 8 インチまで照射可能な大きさに形状変更を行う (第 3.1-2 図参照)。この照射孔の形状変更による増産は約 1.8 倍である。重水タンクの製作には約 60 億円を要し、また交換作業には炉内の放射化物の減衰を待つて作業をしなければならないため 1 年以上の原子炉停止が予定される。なお、この照射開始前には、設置変更許可申請及び設工認等を行わなければならない。

以上の増産のための改造オプションの中から、まずは既存の照射装置の簡易的な改造で約 1.8 倍の増産が見込める外部冷却法を優先的に進めることとした。また、休日、夜間の作業をも容易にできるように Si 照射装置を全自動化する方法を長期的に検討し、約 4 倍の増産及び作業者の被爆を大きく低減することを目指すこととした。



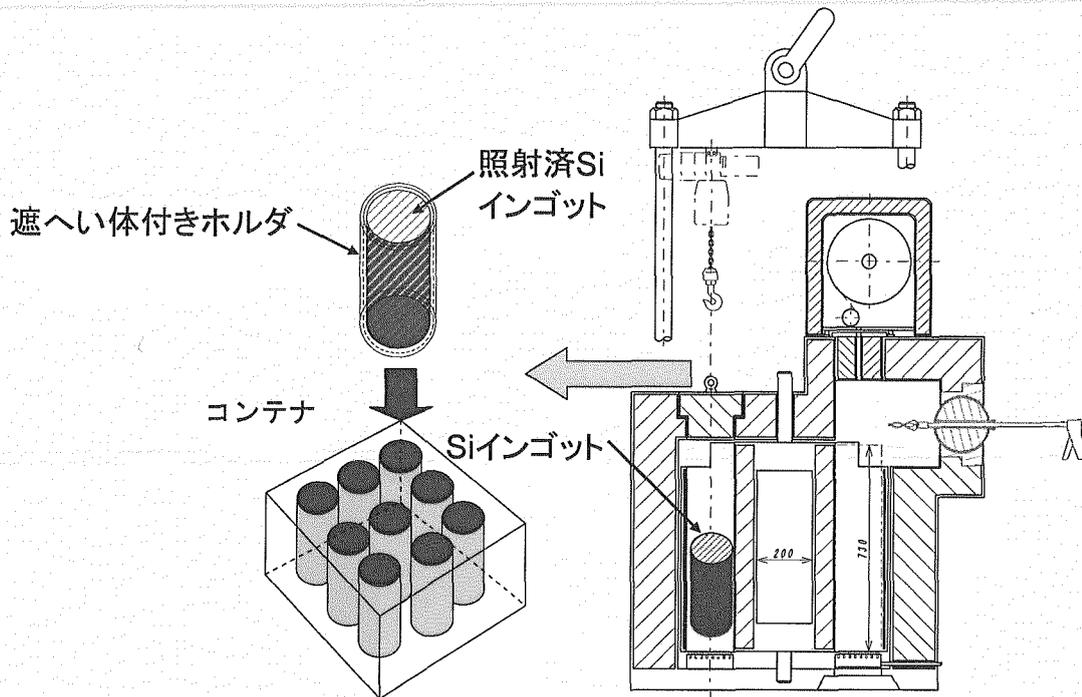
第3.1-1図 均一照射設備概略図

This is a blank page.

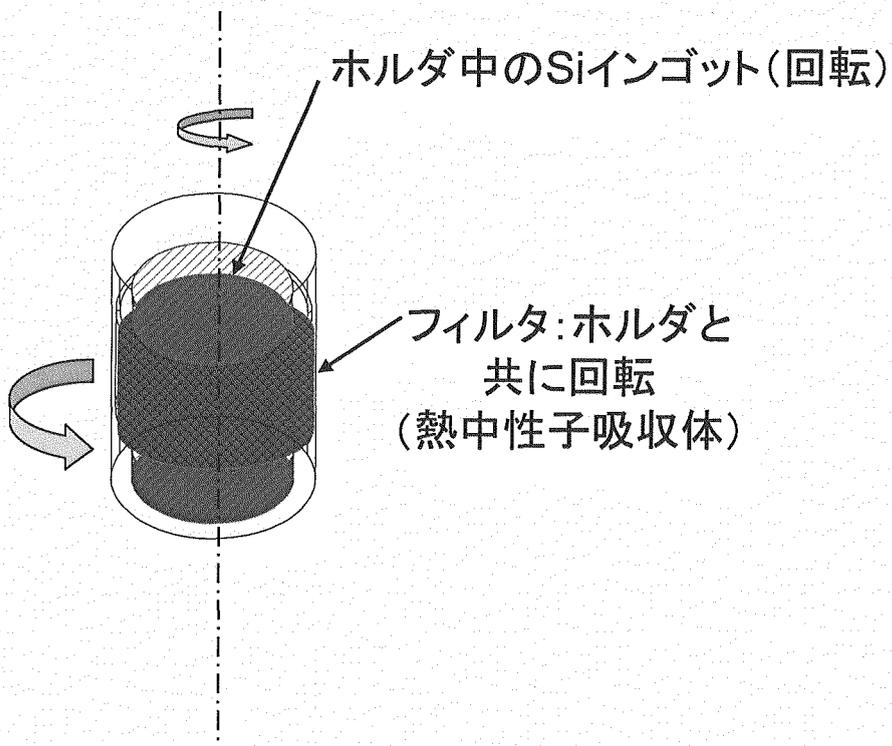


第 3.1-2 図 炉心水平断面図

This is a blank page.

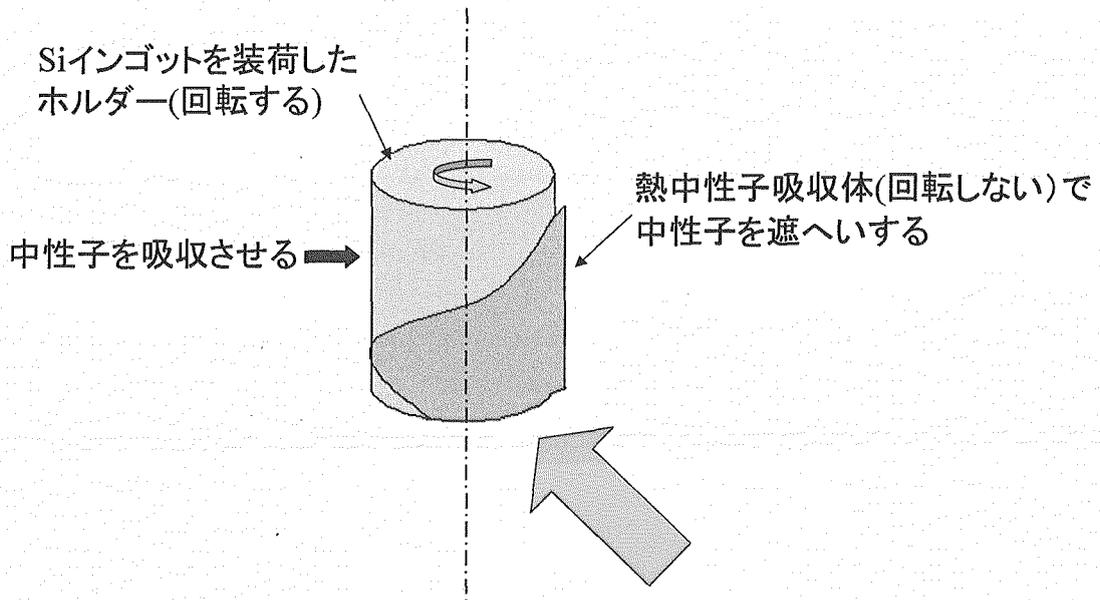


第 3.1-3 外部冷却法の概念

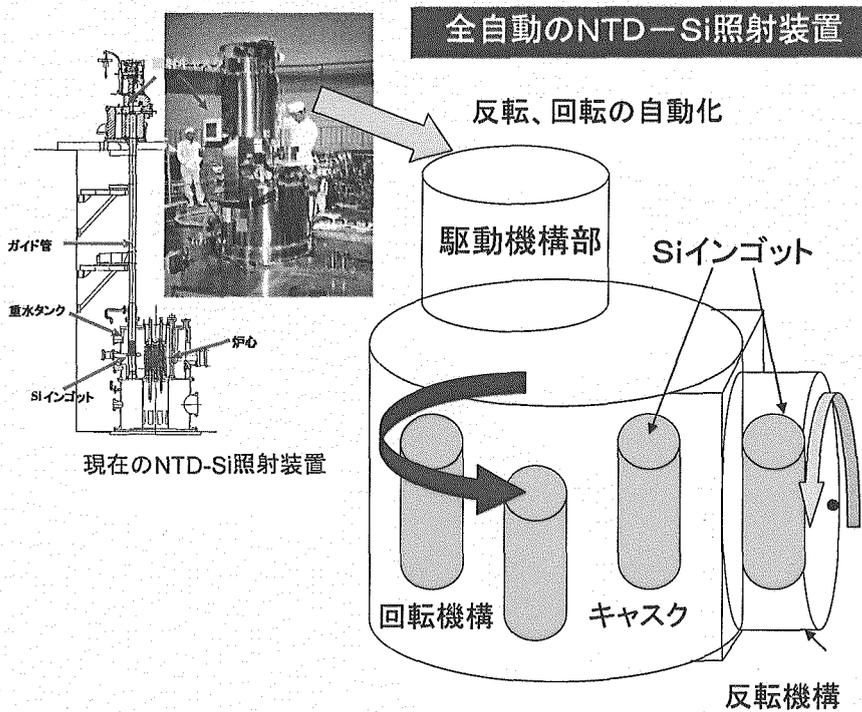


第 3.1-4 図 フィルター法の概念

This is a blank page.



第 3.1-5 図 シャドウ法の概念



第 3.1-6 図 全自動の NTD-Si 照射装置

This is a blank page.

### 3.2 JRR-4 の利用

JRR-4 での Si(シリコン)照射は、1977 年 7 月より D パイプ照射筒を利用して 2.5 インチまでの照射を行っていたが、1978 年 1 月に Si 照射専用の L パイプ照射筒が設置されたことで 4 インチまでの照射が可能になった。さらに 1998 年 10 月からは、JRR-4 燃料低濃縮化工事に伴い設置した N パイプ照射筒(L パイプ改造)により 5 インチまでの照射が可能となっている。最近の照射実績としては 5 インチ Si を中心に、年間約 0.5 トンが照射されている。

N パイプ照射筒を利用した Si 照射は、照射ホルダーと呼ばれるアルミ製円筒容器に Si を収め、炉心タンク上部にある駆動部からチェーンで照射筒まで吊り下げて行う。照射中は径方向の照射量が均一になるよう Si(照射ホルダー)を回転し、また、軸方向の均一化を図るため Si を反転して再度照射するという方法をとっている。このため作業は照射・冷却(約 48 時間)・反転・照射という手順で行う。JRR-4 では、Si は照射終了後速やかに照射ホルダーごと照射筒外に取り出し炉心タンク内に吊り下げた状態で冷却するため、照射筒は直ぐに次の照射に対応できる。従って、照射筒自身は効率良く利用できる。

JRR-4 で Si 半導体の製造を拡大するには、年間における高出力運転日を増やすか新たな照射筒の設置が必要である。

JRR-4 は 1 週間を 1 サイクルとし火曜から金曜まで毎日起動・停止するデイリー運転を年約 40 サイクル(週)行う。しかし、全てが Si 照射に適した高出力運転(3,500kW)ではなく、照射試料の発熱を抑えるための低出力運転、医療照射及び研究者や研修センターの専用運転が実施されるため、Si 照射に利用できるのは年間運転日の約 65 パーセントである。近年、小回りの効く JRR-4 に対して特殊な運転要望も多いため、Si 照射に適した高出力運転日を増やすのは非常に難しい状況にある。このような状況ではあるが Si 半導体の増産のための検討を行った。

#### (1) 炉心タンク内に大口径照射筒を設置

新たな照射筒を設置する場合、今後 NTD 照射で主流となるであろう 8 インチ Si(大口径)に対応した設備の設置を検討する必要がある。しかし、炉心タンク内に大口径照射筒を設置するには、反射体要素約 9 体分のスペースを確保しなければならない(第 3.2-1 図参照)。現在の炉心構成ではそれだけのスペースを確保するには燃料要素の配置変更を必要とする。この場合、原子炉の核特性や利用設備の特性にも影響を及ぼすことから設置許可変更が必要となる。

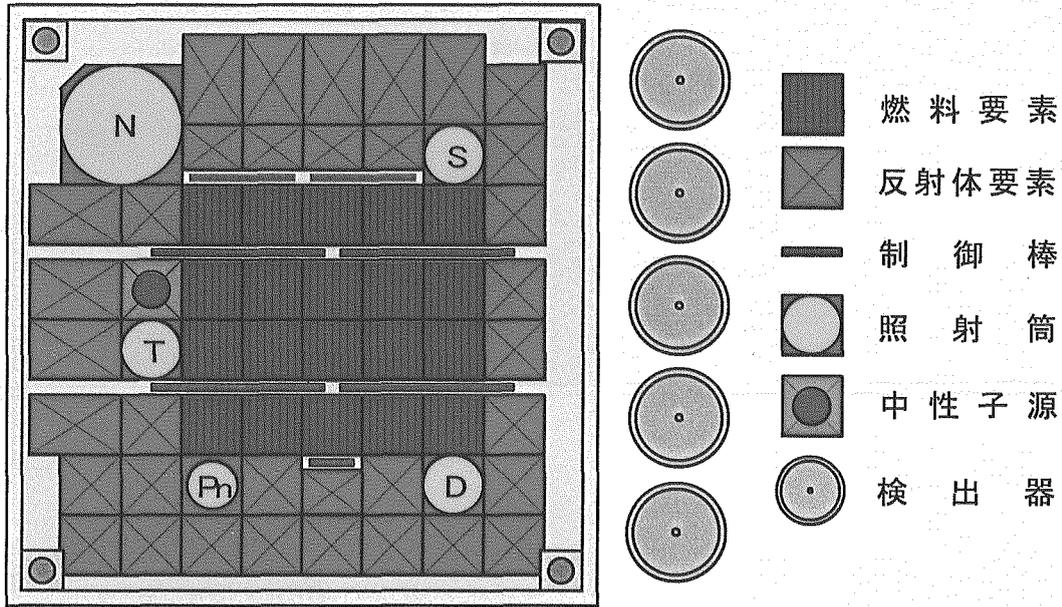
#### (2) 炉心タンク外に大口径照射筒を設置

一方、炉心タンク外への設置であればそのような問題は少ない。ただし、炉心タンク内に比べ中性子束は低くなる。そこで性能確認のため中性子束測定を実施してみたところ、No.1 プール側の炉心タンク壁で  $10^{16}(\text{n}/\text{m}^2 \cdot \text{s})$  の熱中性子束が得られることが分かった。この中性子束であれば Si 照射に利用できる。例えば目標抵抗値 250  $\Omega$

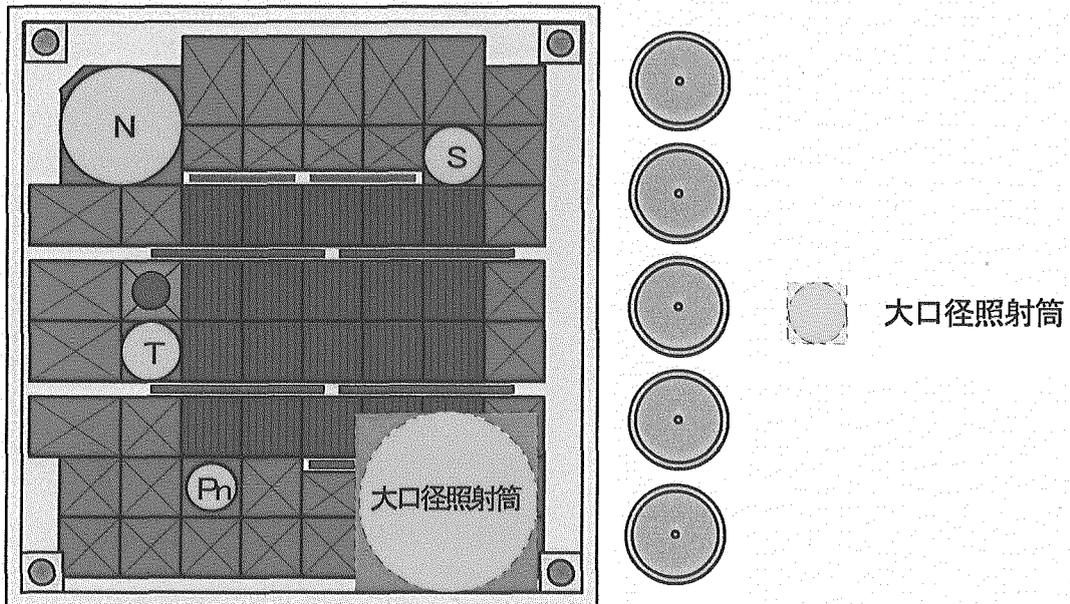
cm の 8 インチ Si なら単純試算で年間約 1 トンの生産増に繋がる。更に、炉心タンク外ということで重水炉に比べ軽水炉では不利といわれる照射損傷の問題も緩和されることも期待できる。第 3.2-2 図に既設の N パイプ照射筒と現在検討中の大口径照射筒の配置図を示す。

以上の Si 増産のオプションの中から、新たな照射筒を設置することを考え、炉心タンクの外では、内側に比べ中性子束が約 1/10 になるが、8 インチにとどまらず 12 インチの照射も可能であることから、炉心タンクの外に照射筒を優先的に検討することとした。今後は計算コード(MCNP)を用いて最も性能の良い照射設備の体系を探るとともに、実試料(8 インチ Si)による特性測定の実施を検討する事としている。なお、8 インチ照射筒の製作・設置に掛かる費用の見積もりは 6 千万円程度と見込まれる。

炉心配置図

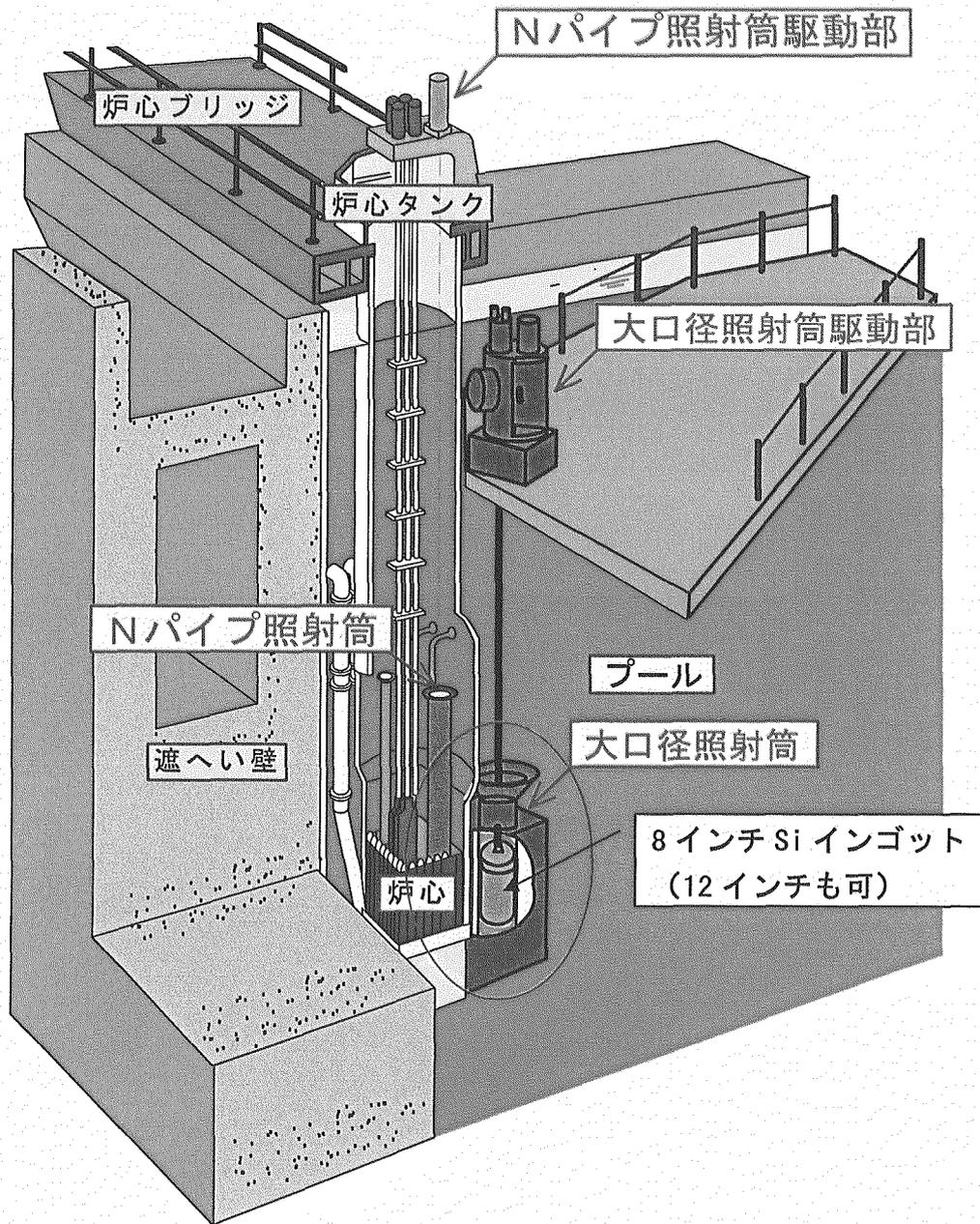


↓ 大口径照射筒を設置した場合のイメージ



第3.2-1図 JRR-4炉心タンク内に大口径照射筒を設けた場合の配置

This is a blank page.



第3.2-2図 大口径照射筒を炉心タンクの外に配置した場合の配置図

This is a blank page.

### 3.3 JMTRの利用

JMTRでは、これまで軽水炉燃料、材料の照射試験、RI生産等が主目的であったため、NTD-Siの生産を行っていなかった。しかし、今後、NTD-Siの需要が増大すると予想されることからJMTRを利用したNTD-Si生産の検討を行った。検討に当たっては、今後の照射需要が期待できる8インチ（直径約20cm）及び6インチ（直径約15cm）の太径Si単結晶の照射を想定し、JMTRの圧力容器内で照射する場合と炉プールで照射する場合について検討した。

#### (1) 原子炉圧力容器内での照射

8インチ及び6インチ径のSi単結晶を原子炉圧力容器内で照射する場合、原子炉上蓋の改造が必要となるが、原子炉上蓋の改造には技術的な課題が多く、また多額の費用が必要となることから実現性が低い。このため、原子炉上蓋にある小判蓋を改造して、専用の照射装置を設置する方法を検討した。圧力容器上蓋の写真を第3.3-1図に示す。照射装置は、改造した小判蓋を介して原子炉圧力容器内に設置し、試料の装荷・取出が行えるほかに、試料の回転、照射後試料の移動・保管等の機能も必要になると考えられる。

小判蓋を改造し、照射装置の炉内管を設置した場合の概念を第3.3-2図に示す。小判蓋を改造する場合は、直管の炉内管設置ができないため、図に示すように湾曲させる必要がある。このため、試料の回転機構には工夫が必要になると考えられる。この照射装置をアルミニウム反射体層2層目付近に設置し〔熱中性子束( $E < 0.683\text{eV}$ )が $2 \times 10^{17}$  ( $\text{n}/\text{m}^2/\text{s}$ )と想定〕、8インチのSi単結晶を照射した場合〔Si半導体製造に必要な中性子照射量を $5 \times 10^{21}$  ( $\text{n}/\text{m}^2$ )と仮定、1サイクル30日運転、年間6サイクル運転を想定〕、年間で約20トンのSi半導体を製造できる可能性がある。これに、更に6インチのSi単結晶が照射できる設備を追加すると年間で約30トンのSi半導体を生産できる可能性がある。

この様に、JMTRを利用してSi半導体を生産できる可能性はあるが、以下の技術的な課題を克服する必要があるため、検討を進めている。

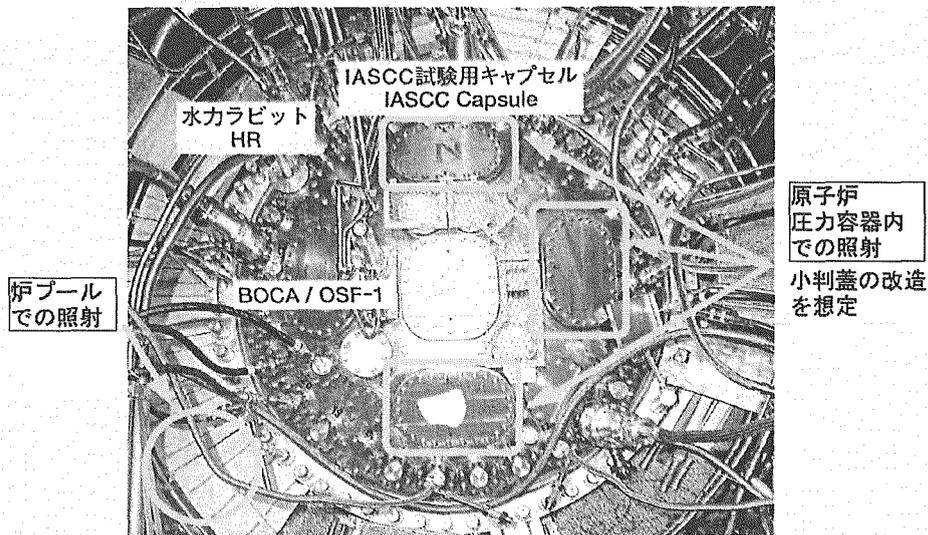
- 1) Si単結晶装荷・取出時の原子炉出力計測用中性子検出器への影響
- 2) 自動試料交換機能を有する照射装置
- 3) 照射したSi単結晶の移動・保管方法

#### (2) 原子炉圧力容器外周の炉プールを利用した場合の照射

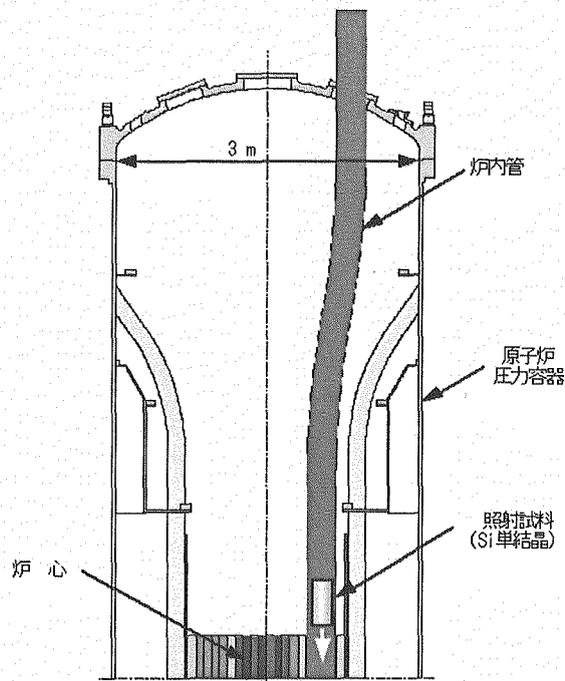
炉心から炉プールに漏れだしてくる熱中性子が利用できれば、比較的安価な照射装置でSi単結晶の照射が可能であるとともに、複数台の照射装置が設置可能と考えられる。炉プールを利用した場合の概念を第3.3-1図及び第3.3-3図に示す。この場合、直径12インチ（直径約30cm）の太径Siにも対応できると考えら

This is a blank page.

れるが、熱中性子束が低いために、生産量は年間数トン程度と考えられ、大量製造には向かないと予想される。炉プールを利用した製造方法を検討するため、平成17年度中に炉プールの熱中性子束を測定する予定である。

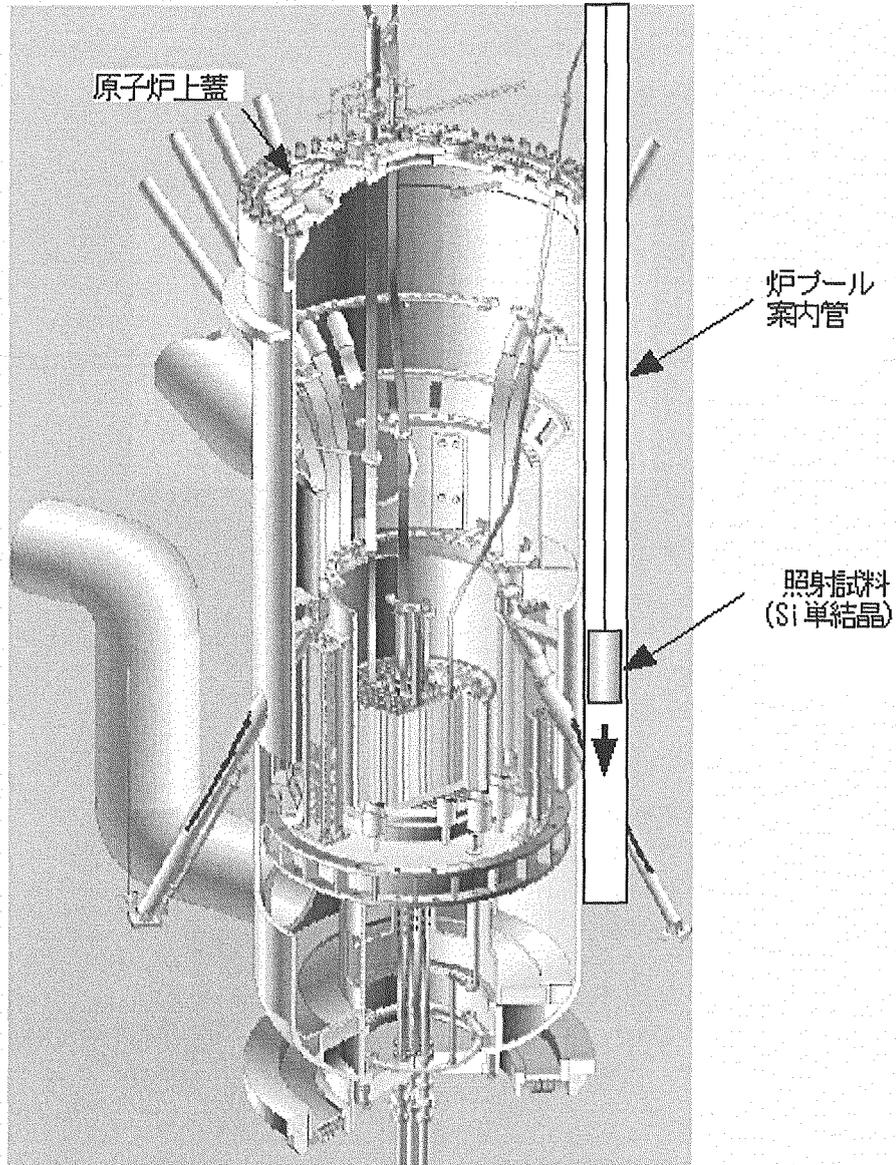


第 3. 3-1 図 JMTR の原子炉上蓋



第 3. 3-2 図 原子炉圧容器内で 8 インチ Si の照射を想定した場合の概念

This is a blank page.



第 3.3-3 図 JMTR の炉プールを利用した場合の概念

This is a blank page.

#### 4. NTD-Si 半導体製造拡大に関する産学官の連携で取組むべき課題

##### 4.1 製造コストの低減対策

###### (1) 照射料金の推移

一般には製造コストは、メーカー側における Si 単結晶の製造単価に加え国内外の輸送に係わる経費(運賃、梱包、出入管手続き費用、保険料など)、そして研究炉等を利用して照射する費用、すなわち照射料金からなる。さらに、照射料金は細かく中性子費、人件費、必要経費、管理費からの積み上げとなっている。ここでは照射料金に論点を絞り概説する。

まず、海外炉は南ア連邦の SAFARI-I 炉を除く全ての原子炉施設が、Si 照射の事業活動を外部機関に委託せず直営で実施している。南ア連邦の SAFARI-I 炉では、原子力機構の研究炉における放振協の立場と同様に共同利用料金を払って、外部機関が照射事業を実施していると聞く。従って、ほとんどの海外炉は、原子炉施設の運転保守の一環として施設職員が照射作業に従事するため Si 照射に限った新たな人件費は生じることなく、加えて直勤務態勢での対応が図られるため大量照射が可能である。さらに米国 MURR 炉および MITR-II 炉の場合は、大学炉であることから、学生への授業実習の一環として Si 照射作業を行うことから、海外炉の中でも特に照射料金が安く設定されている。

約 10 年前の照射料金は、米国 MURR 炉の 6.6¥/g、オーストラリア HIFAR 炉が 13.0¥/g、デンマーク DR-3 炉で 15.9¥/g 等であった(国内 Si メーカーからの聴衆)。フランス、スウェーデン等の欧州炉は総じて高く約 20~25¥/g であり、当時海外炉全体の平均は 17.5¥/g であった。そのなかで日本は 32.9¥/g と特に高かった。その後この 10 年間で照射料金の国際競争は熾烈さを増し、大幅に低下してきているが、各国の相対傾向は現在も変わっていない。第 4.1-1 図に 2004 年度現在推定される主な原子炉での照射料金を示す。韓国 HANARO は昨年 Si 照射活動を開始し、世界市場の照射料金の平均単価(約 10¥/g)を充分意識した価格設定をおこなっている。また、中国の研究炉 3 基が積極的に Si 照射を実施していることの紹介をすでに行ったが、国外への輸出の実績はない。国内向けの照射料金は 5¥/g 程度との情報を得ている。そこで放振協は、昨秋中国 MJTR 炉と照射委託契約を結び照射試験を実施した。交渉の結果、このとき取り交わした照射料金が 8¥/g であった。

照射料金の設定において、NTD-Si 照射に特化した割り増しが付加されている場合がある。それは、照射に供する Si 単結晶のロッドが高額であることとデバイスメーカーと素材メーカー間の Just in Time 方式に基づく契約に関係する。Si 単結晶は強度的に大変もろく、ちょっとした不注意な取扱で欠けてしまう場合がある。また、照射抵抗値が設定した目標抵抗率の許容値範囲から外れる場合が起こる。このような場合は高価なロッドを駄目にしたことによる相応のペナルティ額を照射側は素材メーカーに支払う

ことになる。また、原子炉が計画外停止などに起因して照射不履行が生じた場合にも損害弁償の責務が生ずる。従って、予めこのリスクを照射料金に含め割高なのが欧州炉である。逆に品質管理面からリスクが大きく国際競争に参加できないのが中国である。

この10年間で照射料金は約4割低下しており、半導体デバイスそのものの価格競争に加え、20基を超える原子炉が競合している現状から今後も毎年この安価傾向は避けて通れないものと考えられる。すでに放振協ではここ数年毎年2~3¥/gの切り下げを実施し、今年度15¥/gへの値下げを余儀なくされた。以上のごとく照射料金の推移から、半導体産業の熾烈なる国際市場競争の中でのSi照射事業の置かれた立場の一端が理解できる。

## (2)コスト低減化の対策

放振協における本年度設定の照射料金15¥/gの内訳は、原子力機構へ支払う共同利用料金が5¥/g(全体の1/3)、残り10¥/gが全て作業関係者の人件費の配分となる。昨年度18¥/gの段階では、生産量3.5トンに損益分岐点がありこれを上回ることによって純益をもたらした。今年度15¥/gは、総生産量の損益分岐点は4.0トンになり、原子力機構の研究炉がもつ最大照射容量に達する。従って、4トンを少しでも下回ると赤字決算となるので、これを補うためJRR-4の積極的な活用の展開を図っているのが現状である。

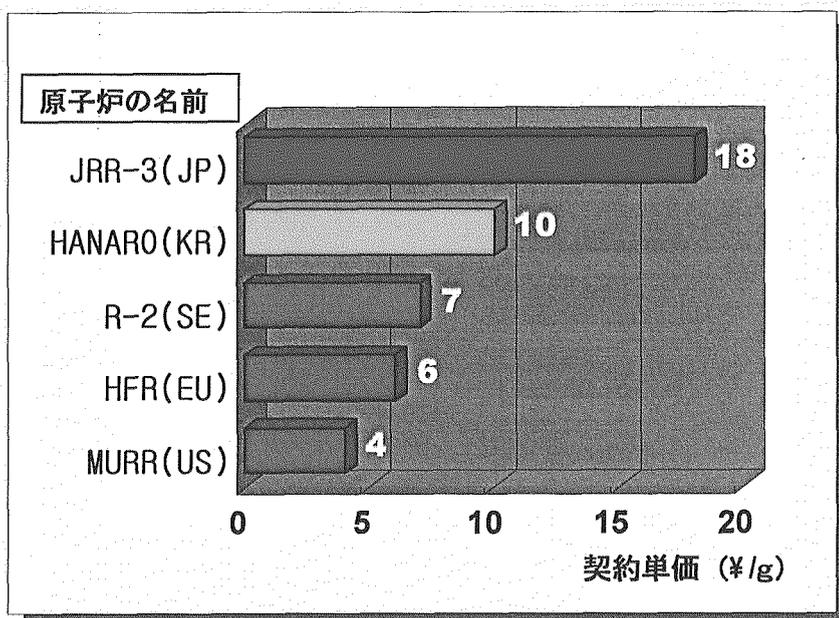
この事実から分かるように、生産量をベースとした損益分岐点は、照射料金の変動に連動し、年々増加している。ある程度の純益を生み出し続けるためには、常に損益分岐点を超える年間総生産量を確保する必要がある。言い換えると、照射容量の大きい照射設備を有することが必須要件となる。さらにその一方で、占有率の高い人件費を削減することが必要で、放振協では作業関係者を6名から3名まで半減している。しかし、この削減にも限界がある。やはり今後目指すべきは、メカトロを積極的に導入した照射装置の自動運転化等を行い生産量を高める必要がある。最終的には無人化による作業の合理化が理想である。

今後、施設運営にあてがうための自己収入源としてSi照射事業をとらえた活動を展開するためには、以下の手順を考慮することが肝要と考える。

- ①国内Siメーカーが海外炉に依存する約90トンを視野に入れ、需要を国内炉に向けるため「半導体は我が国の基幹産業であることに鑑み、国内におけるSiの安定な供給体制を整備すべき」との観点でのキャンペーンを立ち上げる。
- ②国際競争を前提に照射料金を国際平均額を下回る照射料金を設定する（現状では、9¥/g程度が妥当）。「薄利多売」方策を展開する。
- ③低価格照射料金の設定により損益分岐点は約9トンに跳ね上がる。充分純益が見込めるよう国内供給能力を20トン以上に定め、設備整備を実行する。

④Just in Time 方式に即し、年間を通して安定な NTD-Si の供給を保証するため海外炉との連携を含めた複数基(3 基が望ましい)による供給ネットワークを確立する。

国内 Si 供給メーカーは、安価な照射料で安定供給が保証されれば異論のないところであろう。しかし、前述のようにエンドユーザーであるデバイスメーカーが、次期設備投資として在来法製品か NTD 法製品かの選択判断を下す時期が間近に迫っている。それまでの間に企業側を説得できる具体的実施計画がまとまりうるかが最大の課題と考える。



第 4.1-1 図 主な研究炉における照射料金(2004 年度)

#### 4.2 大口径化・均一化に向けた照射技術の高度化

半導体市場の回復が遅れている中、半導体メーカーは品質向上とコスト削減に躍起である。既に市場での生き残りをかけ 12 インチウエハの生産に入ったメーカーもある。

研究炉での中性子照射 Si (NTD-Si )についても、現在主流の 6 インチが 8 インチに移行するのは時間の問題で、既にオーストラリアの HIFAR、フランスの ORPHEE など 8 インチに対応した設備を持っている。

原子力機構の研究炉では、JRR-3 で照射している 6 インチ Si が最大である(JRR-4 は 5 インチ)。研究炉で大口径 Si (8 インチ)を照射するには、設備の改造を伴う。

JRR-3 の場合、Si 照射用の Si 孔は炉心を囲む重水タンクに設置されており、これを

This is a blank page.

このまま大口径化へ改造することは構造的に困難である。装置の改造または新設となれば必然的に重水タンクの更新時期に合わせて行うことになる。

JRR-4 についても、現状の N パイプ位置での大口径化はスペース的に難しい。炉心タンク内への新たな照射筒設置も 3.2 節で述べたように設置許可変更を伴う大きな改造となる。しかし、炉心タンク外のプールであれば設置は容易である。

今後、新たに大口径照射筒を設置する場合、Si を回転させながら炉心部(熱中性子場)を通過させる構造とするのが望ましい。これにより径方向と軸方向の均一化が同時に図れる。また、3.1 節で述べたフィルター法による均一化にも対応出来るよう照射容器の内径に余裕を持たせた形状とし、フィルター未装着時は純アルミ材に置き換えるなどの工夫も必要である。

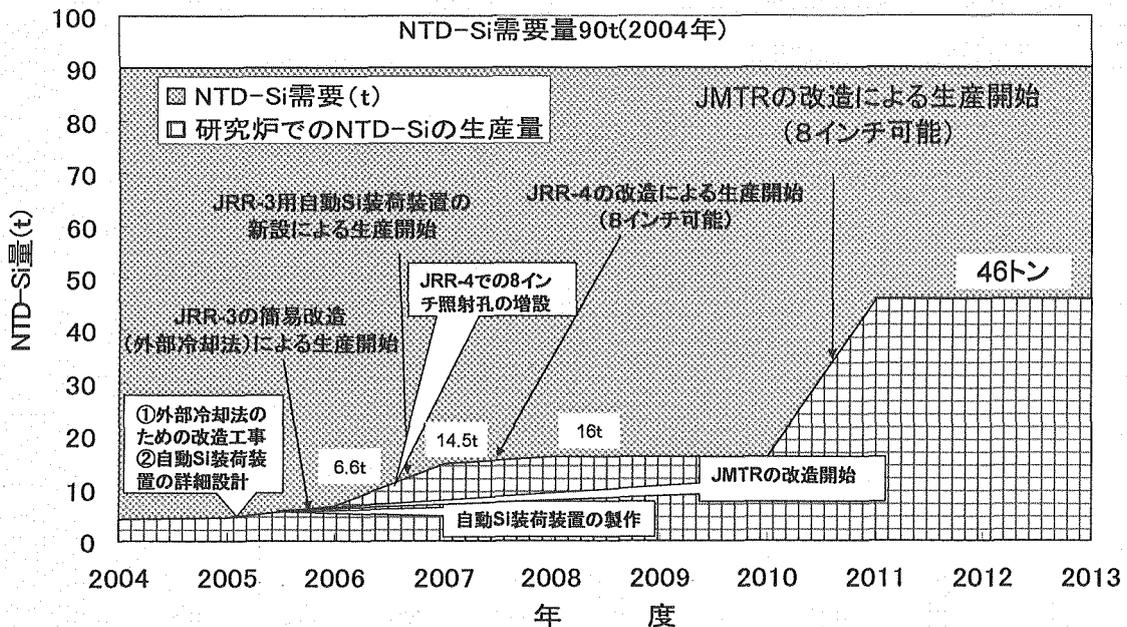
更に、熱中性子束の変動や照射後の中性子モニターの測定誤差が照射精度に影響を与えることから、熱中性子検出器(SPND)の数を増やして中性子束分布の的確な把握に備える。また、中性子モニター測定用の検出器を効率の良いものに変更することなども、均一化には欠かせない有益な方法である。

This is a blank page.

4.3 安定供給のための国内外の体制

研究炉におけるNTD-Siの生産は、JRR-3が約3.9トン/年、JRR-4が約0.7トン/年であり、世界の需要およそ160トン/年(2004年推定値)及び日本の需要およそ90トン/年に比し、かなり少量である。オーストラリアのHIFAR炉は世界の約16%を生産し、韓国の研究炉(HANARO)においてもJRR-3の約2倍の生産量である(第2.2-2図参照)。国内需要に対して極力、国内生産し安定供給をはかるという観点からも、上記3章に述べたようなJRR-3、JRR-4及びJMTRの改造等を行い生産を約46トンまで高め、国内要(約90トン)に近づける必要がある。これらJRR-3、JRR-4及びJMTRの改造等により見込まれるNTD-Siの増産を第4.3-1図に示す。

中国では研究炉が2基(北京:CARR、成都市:JRR-3M炉に類似した炉)新設(第2.2-1図参照)される予定である。更に、不足する分には、アジア圏(中国、韓国)の研究炉を相補的に活用し、年間を通じて国内のSi半導体の需要を満足する必要がある。これによって、信頼性を得ることができ、メーカーはエピタキシャルSiウエハで妥協することなく、NTD-Siウエハを選択することとなる。また、結果として原子力機構が継続的にSi半導体産業に貢献できることになる。



第4.3-1図 JRR-3、JRR-4及びJMTRの改造等により見込まれるNTD-Siの増産

This is a blank page.

## 5. NTD法による SiC 半導体製造技術の課題

### 5.1 SiC 半導体の特長と応用分野

炭化ケイ素(SiC)半導体は、シリコン(Si)原子と炭素(C)原子が1:1の割合で結合した化合物半導体であり、原子間結合は基本的には共有結合型であるが、SiとCの電子陰性度の違いから約18%のイオン性を持つ。また、SiCの結晶構造は多様で、100種類を越える結晶多形(ポリタイプ)が知られている。この中で代表的な立方晶SiC(3C-SiC)と六方晶SiC(4H-SiC、6H-SiC)の結晶構造及び結晶の実物を第5.1-1図に示す。ここで、CとHは各々立方晶(Cubic)、六方晶(Hexagonal)を意味し、その前の数字は繰返し周期を表している。3C-SiCは $\beta$ -SiCとも呼ばれ、それ以外のポリタイプは総称して $\alpha$ -SiCとされている。

SiC半導体の諸特性をSiやガリウム砒素(GaAs)等と比較して第5.1-1表に示す。SiCは、その結晶構造にも依存するが、禁制帯幅がSiに比べ2~3倍広いワイドギャップ半導体である。さらに、Siと比較して絶縁破壊電界が約1桁大きく、飽和電子ドリフト速度が約2倍、熱伝導度は約3倍大きいことから、高耐電圧、高速動作、高熱伝導及び高温動作が可能で、パワーデバイスや高周波デバイスには最適な材料と見なされている。また、SiCの原子間結合力が強く、放射線による弾き出し損傷が少ないため、耐放射線性デバイスとしても有望視されている。これに加え、ダイヤモンド等の他のワイドギャップ半導体と異なり、SiCはpn両伝導型の制御が可能であり、熱酸化により安定な絶縁膜(酸化膜)が形成できるなど、素子を製作する上でも有利な特長を兼ね備えており、近年そのデバイス化には大きな期待が寄せられている。

デバイス応用のうち最も期待されているのがパワーエレクトロニクス分野である。現在のパワーデバイスの大半はSi半導体で製作されているが、その性能はSiの物性値から由来する限界に達しつつある。これを打破し、更なる性能向上が見込めるのがSiC半導体であり、第5.1-1表に示すように、高速・大電力パワーデバイスとしての性能指標であるJohnson指数 $M_j$ はSiより2桁大きく、SiCの高いポテンシャルが示されている。また、具体的なパワーデバイス応用としては、電力向けのサイリスタ、産業機器向けのGTO(Gate Turn Off サイリスタ)、鉄道向けの高耐圧IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)、家電・自動車向けのIGBT及びMOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)が挙げられており(第5.1-2図)、現在デバイス実現に向けた研究開発が精力的に進められている。

### 5.2 NTD 技術の位置付け

中性子核変換ドーピング(NTD)技術は、Si半導体と同様に、SiC半導体の改質においても有効である。原理的には、熱中性子による核反応 $^{30}\text{Si}(n,\gamma)^{31}\text{Si} \rightarrow ^{31}\text{P}$ を利用したリン(P)ドナー原子の導入によりSiC半導体の電気特性を制御するもので、バルク

全体を均一に制御できる特長を有する。さらに、SiCはSiに比べて熱中性子の吸収・散乱の比率が小さく、Siより均一性の高い不純物分布が達成できるため、NTD技術の特長が大いに活かせることになる。一方、Pや窒素(N)等のドナー不純物やアルミニウム(Al)等のアクセプター不純物は、SiC半導体における熱拡散係数が極めて小さく、熱拡散法でこれらの不純物の均一添加は不可能である。従って、SiC半導体に対してはNTDが唯一の均一不純物添加法と見なすことができ、ドナーやアクセプター不純物を極力低減させた高品質SiC単結晶に対して極めて有効な電気特性制御技術となる。

このようにNTD技術は半導体内部の抵抗を極めて均一に制御できることから、局部的電流集中による逆電圧・スイッチング特性低下やデバイス破壊を低減する事が不可欠なパワーデバイスの製作には極めて有用な技術である。このため、Si半導体に対してはパワーデバイス応用を主目的に原子炉を用いたNTD処理が実施されてきた。将来の電力の効率的利用やハイブリッド自動車・燃料電池自動車のパワー制御用の低損失・高機能デバイスへの応用が期待されているSiC半導体に対しても、Siと同様にNTD技術は非常に有効であり、SiCパワーデバイス実現を目指す研究開発の一環としてNTD技術の開発を進めることは重要である。

### 5.3 技術開発の現状と課題

SiC半導体のNTDによるp型からn型への電気伝導特性変化については、ドイツのエアランゲン大学や京都大学から既に報告されており、原子力機構においてもJMTR炉を用いた中性子照射試験で確認がなされている。しかしながら、これらの実験は全て現象論的な確認に止まっており、NTD技術の実用化の観点からの開発は行われていないのが現状である。また、これまでの原子力機構における研究開発を基に検討した結果、以下のような課題が挙げられる。

第1の課題は、高品質高純度(高抵抗)SiC単結晶の製作である。SiC半導体は、Si半導体とは異なり、融液からの結晶成長ができないため、改良レーリ法と呼ばれる昇華手法により単結晶が合成されている。具体的には、第5.3-1図に示すように、閉ざされた黒鉛るつぼの中にSiC種結晶と原料となるSiC粉末を充填し、2000℃を超える環境で原料を昇華させ、低温部に設置された種結晶上に再結晶化させる。本手法では、原料だけでなく、るつぼ本体からも昇華が起こり、これらに含有される不純物が再結晶化時に混入するため、不純物の制御が極めて難しい状況にある。さらに大気中に多量に存在する窒素がSiCのドナー不純物として作用するため、結晶成長時のN混入は高抵抗化の妨げとなる。

Si半導体のNTDにおいては、Float Zoning Method(FZ)法により高純度化された高抵抗Siが使用されるが、これは従来のCZ法で得られるSi結晶に含まれる不純物の量が多く、NTDによるPドナー添加の効果は現れなくなることに起因する。SiC

半導体に対しても状況は同じであり、元々の結晶中に不要な不純物が多いと NTD 技術の適用は意味がない。このため、SiC 結晶成長時の不純物低減は非常に重要である。また、結晶成長時に導入される重元素不純物は、熱中性子の照射により放射化し、長期に残留する可能性がある(第 5.3-2 図)。これはパワーデバイス製作後の取扱いにも影響を及ぼすため、残留放射能の低減は極めて大きな課題である。このためにも、SiC 単結晶の高純度化が極めて重要となる。

実際の SiC デバイスの製作では、改良レーリー法で製作した SiC ウエハの上に高純度の原料ガス(シランやプロパンなど)を用いた化学気相成長(CVD)法によって高品質の SiC 単結晶膜を堆積(エピタキシャル成長)させ(第 5.3-3 図)、この部分をデバイス駆動領域として使うのが一般的となっている。CVD 成長により作製した SiC 単結晶では高純度化が可能なため、高速成長技術の開発で数 100 $\mu\text{m}$  以上の厚い膜が製作できれば、レーリー成長ウエハ部を切断等により除去することで高品質高純度 SiC ウエハが得られることになる。このような高品質高純度 SiC ウエハは、NTD 処理の対象としては最適と考えられる。

第2の課題は、熱処理である。Si 半導体の NTD では、原子炉での中性子の照射後に 900 $^{\circ}\text{C}$  程度で熱処理を行えば結晶性が回復し、デバイス製作上問題がない。しかし、SiC 半導体の場合は 2000 $^{\circ}\text{C}$  程度の高温熱処理が必要となる。特に、速中性子が多量に当る条件では、SiC 半導体に激しい損傷が与えられ、結晶性が大きく劣化する。SiC 半導体は、照射により結晶格子が大きく乱されると、熱処理をしても結晶性の回復は極めて困難になる。これは、SiC に多数のポリタイプが存在することにも関係しており、一旦結晶構造が乱れると、昇温時に同時多発的に異なるタイプの結晶が成長し始め、元の単結晶には戻れなくなるのも要因と考えられている。

この問題を解決するには、NTD 時に SiC 半導体の温度を上げて、照射損傷を除去しながら転換 P のドーピングを進めることが鍵となる。原子力機構では、照射時温度の検討を進め、800 $^{\circ}\text{C}$  以上での NTD が非常に有効であるとの結論を導いている。この高温 NTD 技術の開発を進めることで、原子炉中性子照射後の結晶性の乱れを低減できれば、NTD 後の熱処理温度も低下できるものと期待される。

以上の二つが SiC 半導体の NTD 技術開発を進める上での大きな課題であるが、その実用化には更に中性子照射(温度制御)方法、試料搬送方法等の周辺技術を含めた開発が必要になろう。

#### 5.4 今後の展望

経済面で見ると、我が国の 2000 年度の半導体(Si が中心)生産額は、半導体素子が 1 兆 2,310 億円、集積回路が 4 兆 6,152 億円と報告されている。この中で、NTD 技術が有効と考えられる IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)やサイリスタ等のパワーデバイスの生産額は 1,000 億円規模である。SiC 半導体のデバイスプロセス

技術が確立でき、製造コストが低減できれば、現在のパワーデバイスの多くは Si 半導体に代って SiC 半導体が見込まれ、生産額で 1,000 億円規模に達すると推測される。

ただし、現時点では SiC 半導体ウエハ自体の製造コストが高く、市販ウエハの値段は 3 インチ径で 1 枚 50~100 万円である。SiC 半導体が Si に取って代るためにウエハコストとして許容できるのは 4 インチ径で 2 万円とされており、このコスト要求をクリアするためには、高品質大口径 SiC ウエハの作製技術やデバイス化技術の開発の努力とともに、応用による生産量の拡大も必要となる。後者では、ハイブリッド自動車のインバータの小型・軽量化や冷却システムの簡素化、IH クッキングヒータの冷却ファンレス化など、従来の Si デバイスでは得られない付加価値やシステムメリットが評価できる応用分野で SiC デバイスの導入を進めることが重要である。また、燃料電池コジェネレーションシステムや電力貯蔵設備用インバータシステム等のように、損失低減効果が電力コストに換算されて、デバイス導入コストに見合う分野においても積極的にデバイス導入を進めていくことが肝要であり、このような応用による生産量の拡大が低コスト化を進行させる要因となる。勿論、これと平行して技術面におけるコスト削減も大きな課題である。

SiC デバイスがコスト的にも競争力を持つようになるのは、前述したように、4 インチ径ウエハで 2 万円とされている。これに対して Si 半導体の NTD コストの 10 円/g 程度は無視できるほど低い。SiC 半導体の NTD では高温処理が必要になるなど、Si とは異なる技術的課題があるとしても、NTD コストが 100 円/g 程度であれば SiC ウエハ価格の 5%程度に止まり、デバイス価格に大きな影響は与えないものと推測される。

SiC 半導体の実用化を目指すための今後の技術的課題としては、第 5.4-1 図に示すように、ウエハ製造技術として 4 インチ径以上の大口径ウエハの製作、電流リークの原因となる結晶欠陥密度の  $1 \text{ 個}/\text{cm}^2$  以下への低減、高速エピタキシャル成長技術の開発などが挙げられる。プロセス技術としては、オン抵抗の更なる低減、酸化絶縁膜の信頼性向上、プロセス全体の低温化などが課題であり、これ以外にもパッケージングなどの実装や配線技術を含めた周辺技術の開発を進める必要がある。これらの技術開発は、産業技術総合研究所を中心に精力的に進められており、2010 年頃には SiC サイリスタが実現するものと期待される。一方、原子力機構では耐放射線性 SiC デバイスの開発を目指した研究開発が推進されることとなっており、これまで蓄積した技術的知見やノウハウに基づき、SiC サイリスタの実現にあわせて、NTD 技術の開発についても産官学連携の下、推進していく必要がある。

## 5.5 産学官及び原子力機構内の開発体制

SiC 半導体の NTD 技術の開発においては、単結晶ウエハ製造メーカー、パワーデバ

イス開発機関との連携・協力が必要である。NTD 技術そのものの開発については、国内最大級の研究炉・材料試験炉を保有し、中性子照射技術や照射試料の取扱いにも精通する原子力機構の原子力科学研究所及び大洗研究開発センターが担当するのが適切であろう。この2つの原子力機構の研究拠点の他に、SiC半導体開発を進める高崎量子応用研究所も含めた連携体制を構築して、技術開発を進める必要がある。

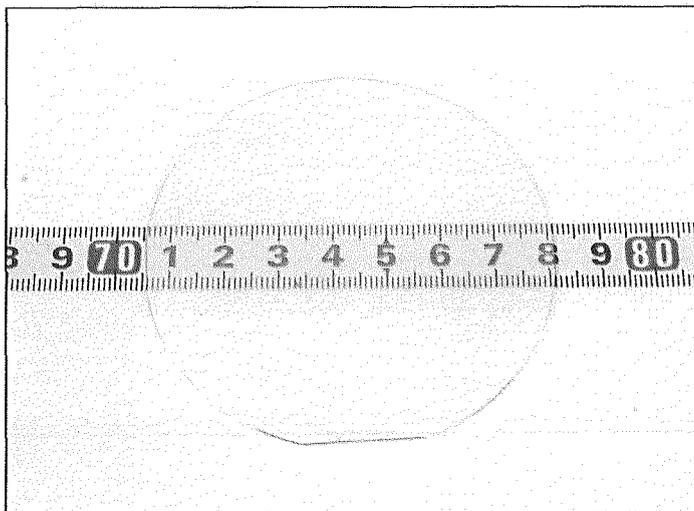
また、第 5.3 節でも記述したが、NTD技術が有用視されるためには高純度高品質 SiCウエハの製造が不可欠であり、国内では新日鐵、SiXON、HOYA アドバンス社が製造・販売を手がけており、これらのメーカーとの連携・協力が重要となる。SiC単結晶のエピタキシャル成長については、現在国内の企業では実施しておらず、産業技術総合研究所や電力中央研究所が世界をリードする高品質単結晶の製作技術を保有する。また、パワーデバイスの製作プロセス技術については、産業技術総合研究所が中核となって国家プロジェクトを推進してきた経緯もあり、多くの技術とノウハウを保有している。

SiC半導体に係る出口を見据えた技術開発を進めるためには、高品質単結晶製造、NTD、デバイス製作まで一貫した開発を行うことが肝要であり、国内SiCウエハ製造メーカ、産業技術総合研究所、電力中央研究所と原子力機構が密接に連携しながら、研究開発を進める必要がある。

第 5.1-1 表 各種半導体の物性値の比較

半導体	Si	GaAs	SiC			ダイヤモンド
			3C	6H	4H	
バンドギャップ (eV)	1.11	1.43	2.20	2.86	3.02	5.47
結晶型	ダイヤモンド	閃亜鉛鉱	閃亜鉛鉱	六方	六方	ダイヤモンド
熱伝導度 (W/cmK)	1.51	0.54	4.9	4.9	4.9	20.9
電子移動度 (cm <sup>2</sup> /Vs)	1500	8500	1000	450	1000	1800
正孔移動度 (cm <sup>2</sup> /Vs)	450	420	70	100	120	1600
飽和ドリフト速度 (cm/s)	1x10 <sup>7</sup>	2x10 <sup>7</sup>	2.7x10 <sup>7</sup>	2.0x10 <sup>7</sup>	2.2x10 <sup>7</sup>	2.5x10 <sup>7</sup>
絶縁破壊電界 (MV/cm)	0.3	0.6	3.0	3.0	3.5	5.6
Johnson 指数 M <sub>J</sub>	1	19	730	400	990	2500

This is a blank page.



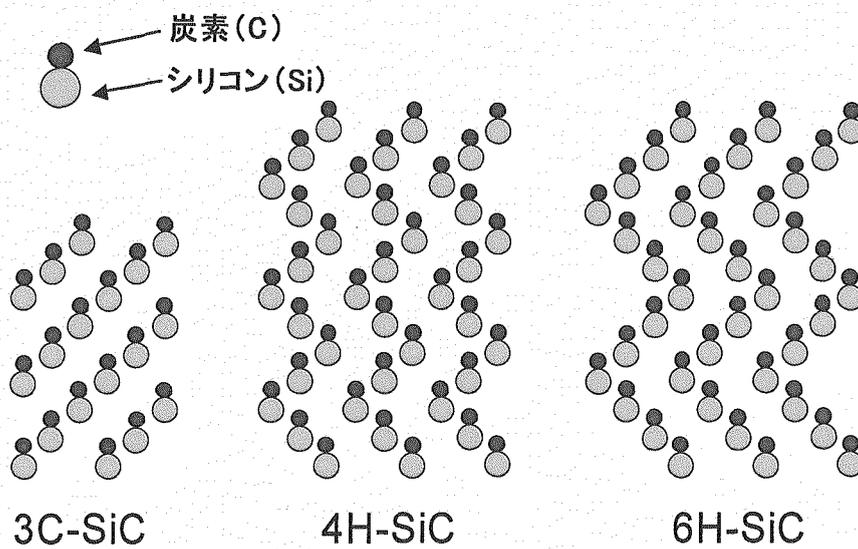
SiC結晶の実物(ウエハ)

Wafer: DC0430-27 Box/Boat Number:44916-0001

Diameter:2.997(inches)

Thickness:394.0(microns)

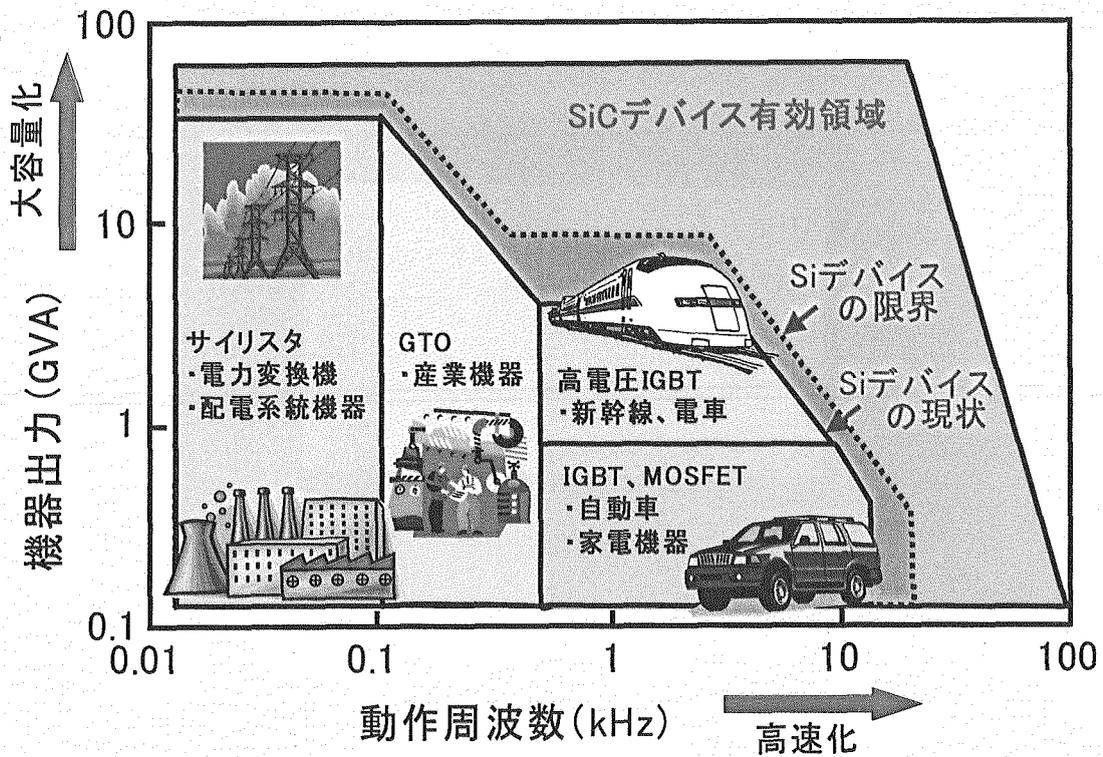
Resistivity: $\geq 1E5$ (ohm-cm)



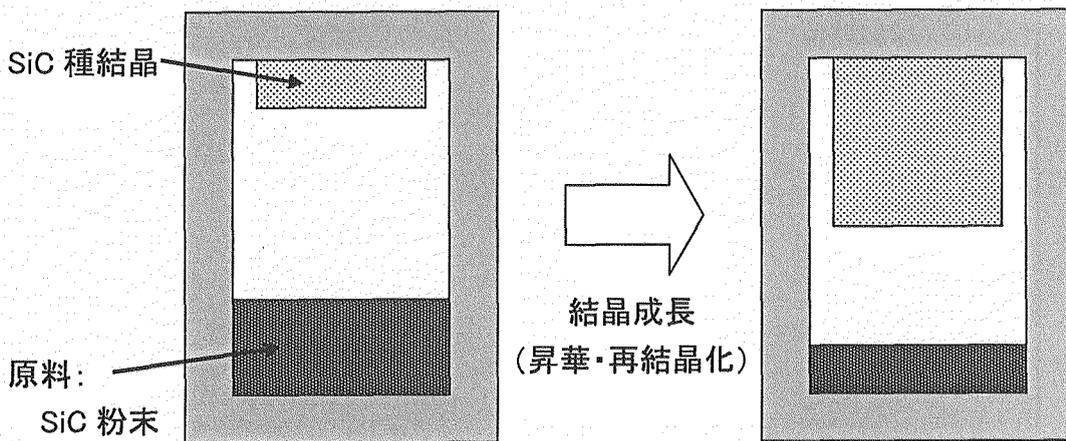
(11-20)面における原子の配列

第 5.1-1 図 代表的なSiC結晶の実物及びその結晶構造

This is a blank page.

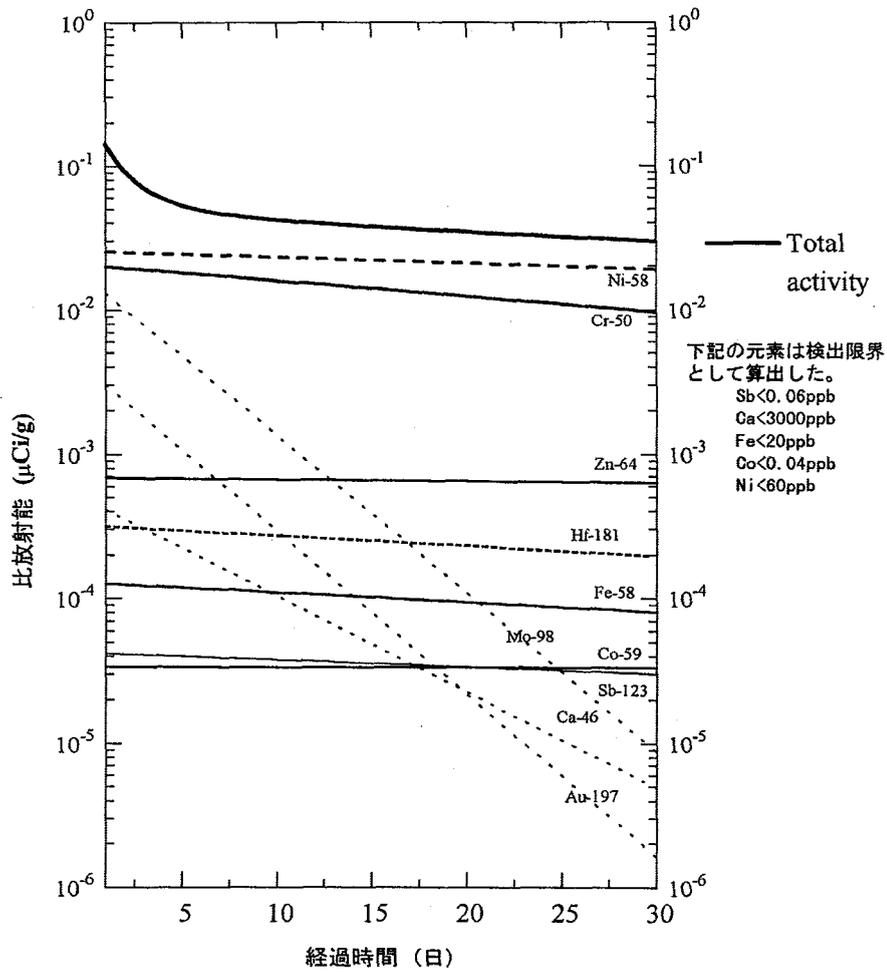


第 5.1-2 図 SiC半導体のパワーデバイス応用

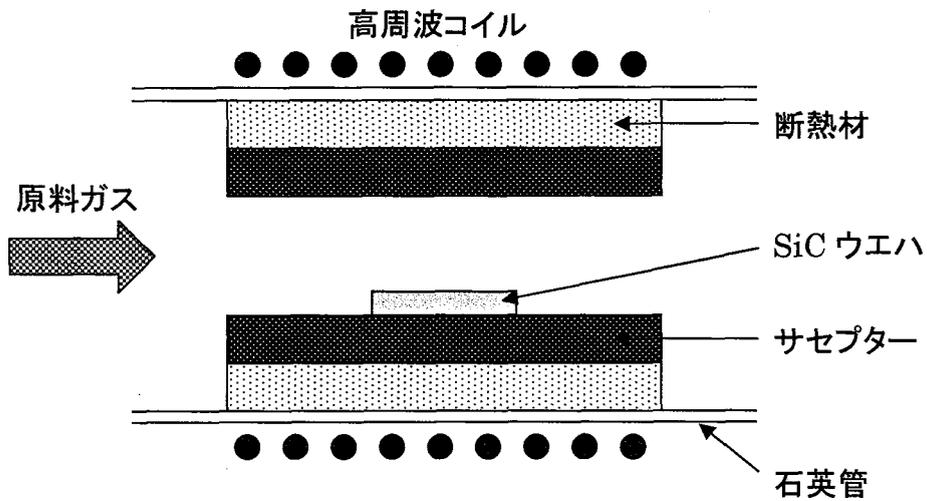


第 5.3-1 図 改良レーリー法による SiC 単結晶の製作

This is a blank page.

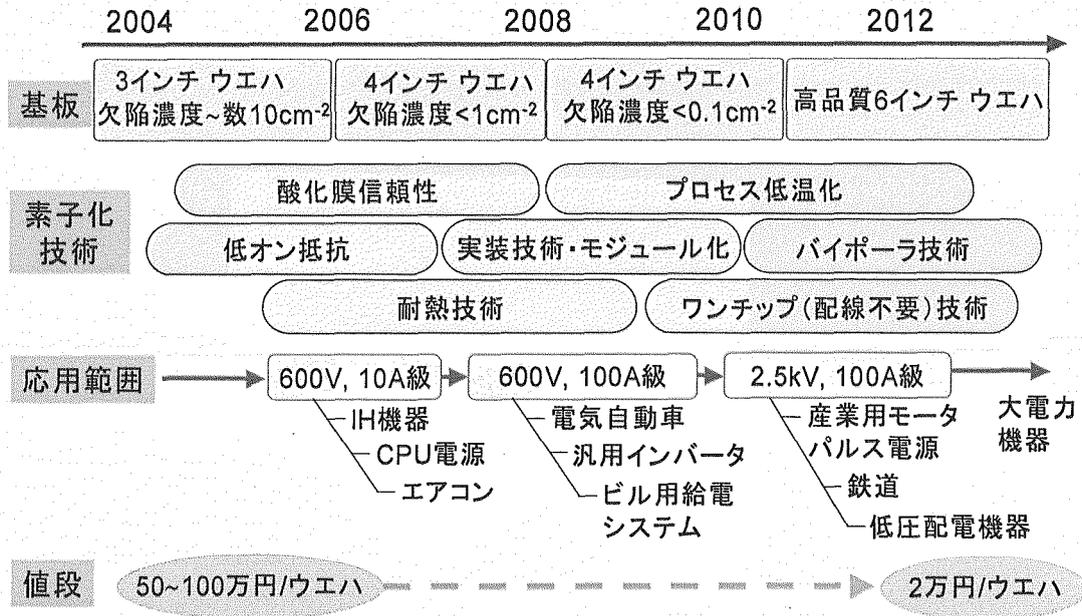


第 5.3-2 図 SiC 半導体の中性子照射による放射化の例  
 (馬場信一、伊藤久義、他2名)



第 5.3-3 図 化学気相成長(CVD)法による SiC のエピタキシャル成長

This is a blank page.



第 5.4-1 図 SiC 半導体開発の今後の展望

This is a blank page.

## 6. おわりに

原子力機構での Si 半導体の NTD サービス業務の将来及び NTD-SiC 半導体製造技術の課題について検討を進め、必要な対応を具体化するための検討を行った。検討のまとめを以下に示す。

(1)近年、高性能の電力制御用半導体素子に用いる NTD-Si の需要が急速に伸びている。しかし、照射料金が 1グラム 15 円台まで下げられたとはいえ、まだ海外炉の平均水準に比べると割高であり、さらに国内では複数炉の連携体制が整備されてなく年間を通じた安定供給が望めないことの原因から需要に対する国内供給は 5%程度と少ない状況である。

(2)この状況を改善するため、JRR-3, JRR-4 及び JMTR の研究炉等を改造し NTD-Si 増産の技術的課題を検討し、その解決策を提案した。

- ・JRR-3 では、Si 照射装置の簡易的な改造で稼働率を高める外部冷却法、フィルター法及びシャドウ方法を提案し、この中から、約 1.8 倍の増産が見込める外部冷却法を優先的にすすめることとする。また、休日、夜間の作業をも容易にできるように Si 照射装置を全自動化する方法を長期的に検討し、約 4 倍の増産を目指すこととする。

- ・JRR-4 では、NTD-Si 製造を拡大する方法として、炉心タンクの外では、内側に比べ中性子束が約 1/10 になるが、8 インチにとどまらず 12 インチの照射も可能であることから、炉心タンクの外に照射筒を優先的に検討する。

- ・JMTR では、8 インチ及び 6 インチ用の照射装置を整備して年間約 30 トンの NTD-Si を目指す。

上記の JRR-3、JRR-4 及び JMTR の改造等を行い NTD-Si 製造を約 46 トンまで高め、国内需要(約 90 トン)の約 50%までの供給を目指す。更に、不足する分は、アジア圏(中国、韓国)の研究炉を相補的に活用し、年間を通じて国内の Si 半導体の需要を満足する必要がある。これによって、メーカーからの信頼性を得ることができ、結果として、原子力機構が継続的に Si 半導体産業に貢献できることになろう。

(3)NTD法により製造する SiC 半導体は、パワーデバイスとして Si 半導体より更なる性能向上が見込まれる半導体である。しかしながら、高純度高品質 SiC 結晶の量産技術、デバイスの製作プロセス技術、速中性子による格子欠陥を回復する技術等を確立すべき段階にある。このため、NTD-SiC 半導体技術を確立するためには、国内 SiC ウエハ製造メーカー、産業技術総合研究所、電力中央研究所及び原子力機構が密接に連携しながら、研究開発を進める必要がある。

謝辞

今回の NTD-Si 製造機能拡充の検討にあたっては、桜井文雄研究炉加速器管理部長、船山佳郎旧研究炉部次長に貴重なご意見を頂いた。また、NTD-Si 製造機能拡充のための具体化の検討においては、研究炉利用課、広瀬彰氏及び中村剛実氏、並びに、JRR-3 管理課米田政夫氏に協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。