

原子力委員会研究開発専門部会加速器検討会報告書
「加速器の現状と将来（案）」に対するご意見への回答

平成16年4月

原子力委員会
研究開発専門部会
加速器検討会

【No. 1】

(概要)

P.2-23 第2-4-1表 我が国のイオン加速器、P.2-26 第2-4-2表 我が国の電子加速器、P.2-31 第2-5-2表 世界の主要放射光施設 の産総研の内容が違っている部分多いので、できれば下記に変更をお願い致します。

(意見)

この報告書の内容をより正確なものとするために、産総研の加速器の内容を下記に修正頂ければ幸いです。

第2-4-1表 我が国のイオン加速器 の産総研の欄

つくばセンター中央：

ペレトロン 4MV 1982 多目的、中性子標準

コッククロフト・ワルトン 0.3MeV 1980 中性子標準

コッククロフト・ワルトン 0.4MeV 1980 イオン注入

つくばセンター東：

タンデムバンデグラフ 1MV 1988 物質材料、表面改質

中部センター：

タンデムバンデグラフ 1.7MV 1988 物質材料、表面分析

関西センター：

タンデムバンデグラフ 1.5MV 1988 物質材料、表面分析、表面改質

バンデグラフ 2MV 1969 物質材料、表面分析

第2-4-2表 我が国の電子加速器 の産総研の欄

つくばセンター：

電子リニアック(TELL) 400MeV 1980 技術開発、入射器、陽電子源

電子蓄積リング(TERAS) 800MeV 1981 放射光利用技術開発、新量子放射源開発

電子蓄積リング(NIJI-II) 600MeV 1989 SR プロセス、偏光変調分光、測光標準

電子蓄積リング(NIJI-IV) 500MeV 1991 FEL 技術開発

第2-5-2表 世界の主要放射光施設 の第二世代放射光源の欄

TERAS 日本 1981 0.8 31.45 550@0.8GeV 0.568@0.8GeV

(回答)

本表については、平成14年に行いました国内外加速器（放射線発生装置）の利用実態に関する調査を基に各研究機関のホームページ等を参考に補足して作成したのですが、ご指摘をふまえ最新のデータに修正いたします。

【No. 2】

(概要)

第3章、3.3 原子力…基盤研究、p.3-10、(4)放射線測定器の開発と校正、の5、6行目は、以下のように、改訂頂ければ幸いです。「こうした目的のために、産総研における標準開発・供給用の利用をはじめとして、多くの加速器が利用されている。」

(意見)

電総研(2000年まで)の時より、イオン加速器を用いた放射線測定器(主に中性子用)の校正は、「依頼試験制度」で実施しており、産総研(2001年以降)においても、国際的な対応を図りつつ、イオン加速器を用いての中性子検出器だけでなく、放射光を用いた光子検出器の校正も一部の波長では可能になっており、その拡大の研究開発も進展しています。また、原研のバンデグラフでの中性子測定器校正は、産総研の中性子グループとの協力で進められています。産総研の計測標準研究部門は、メートル条約に基づく国際度量衡委員会における活動から、種々の物理量、化学量における標準研究所および国家標準の供給機関として世界的に認められていますので、このような状況を踏まえて、本報告書の内容をより良くするため、p.3-10の部分には(3.3 原子力の先導的基盤研究(4)放射線測定器の開発と校正の5,6行目)産総研のアクチビティの記述もお願いしたいと考えます。(修正部分):「こうした目的のために、産総研における標準開発・供給用の利用をはじめとして、多くの加速器が利用されている。」

(回答)

ご指摘をふまえ3 - 10ページ「(4)放射線測定器の開発と校正」の6行目以下を、全体の文脈を考慮して下記のように加筆・修正いたします。

(4)放射線測定器の開発と校正

放射線はエネルギー利用とともに原子力の利用において・・・(略)・・・
・・・多くの加速器が利用されてきたいる。

我が国では、国家標準機関である産総研の加速器が放射線に関する標準開発・供給の役割を担っているのに加えて、1982年にKEKに校正場としてコッククロフト型電子加速器が設置され、また、2002年には我が国で初めての中性子測定器の開発と校正のための専用加速器として4MVバンデグラフ加速器が原研に設置されている。

【No. 3】

(概要)

加速器を用いた高強度陽電子ビームは、半導体デバイスに最適の評価ツールです。加速器と陽電子ビーム技術の発展が、日本の産業界発展のために大いに役立つと考えます。

(意見)

陽電子消滅は古くから材料評価に使用されており、原子が一つ抜けた欠陥である単一原子空孔を極めて高感度で検出できる手法として使われてきました。その特徴をまとめると次のようになります。

- 1) 検出できる欠陥は、単一原子空孔から空隙、ポア(サイズ: 数 10 nm³)程度。
- 2) 空孔検出手法としては高感度(>10¹⁶ cm⁻³)かつ非破壊検査である。
- 3) 試料の温度、伝導性などの制限がない(液体でも可能)。このため、陽電子で評価できる材料は、金属、半導体、絶縁体、高分子と広範囲である。
- 4) 試料最表面から数ミクロンまでの欠陥深さ分布検出が可能。

特に4)の点欠陥の深さ分布検出方法としてはほとんど唯一の評価手法です。この実験を行うには、陽電子を低速・単色化した後、試料に任意のエネルギーで打ち込む必要がありますが、低速・単色化過程の効率が悪く、陽電子線源として極めて高強度の放射性同位元素を使う必要があります。一方、加速器を用いれば、高エネルギー電子の制動放射により大量の陽電子を作り出すことができるため、高強度陽電子発生方法として加速器はきわめて重要な装置となっています。日本でも、複数の実験施設で加速器ベースの低速陽電子ビームラインが立ち上がっており、その質と量は世界トップクラスです。

本稿著者は低速陽電子ビームによる半導体デバイスの評価を行っています。近年、シリコン超大規模集積回路(ULSI)の微細加工のレベルが材料の物理限界に到達しようとしており、その信頼性向上のため、次々と、新材料、新技術が投入されています。当然、それら材料、構造の評価が重要になるわけですが、いままでの実験結果から、陽電子は半導体デバイス微細化に極めて多くの有益な情報を提供することができることがわかってきました。このような応用研究には、加速器ベースの高強度陽電子ビームの利用が必須であり、加速器技術と陽電子消滅実験の発展が、日本の産業界、特に半導体産業に大きな貢献をするものと信じます。

(回答)

意見No. 8と纏めて回答いたします。(9ページ参照)

【No. 4】

(概要)

報告書では、加速器を用いた陽電子利用物質研究の最近の状況についての記述が不十分のように思われますので、陽電子ビーム技術の進展、産業界とのかかわりなどの記述の追加をお願いしたいと思います。またこれに関連して、p.2-13 の第 2-2 表の中の、“電子線の利用”と“ミューオンの利用”の間に、“陽電子の利用”を下記のように含めて頂ければ幸いです。

(意見)

報告書の p.3-7 に陽電子消滅法による材料評価の基本的原理についての記述がありますが、加速器を用いた陽電子消滅法では欠かせない低速陽電子ビーム技術、加速器を用いた陽電子消滅法の最近の進展、産業界とのかかわり等、最近の加速器を用いた陽電子研究の状況についてより十分な情報が得られるように、p.3-7(d)の第一パラグラフを以下のように変更していただくよう希望致します。

陽電子は物質中では電子と対消滅を起こし、主に二つのガンマ線(511keV)を反対方向に放出する。このガンマ線の角度分布、エネルギー、放出時刻を高精度で測定することにより、電子の運動量分布やミクロな構造を知ることができる。

加速器を用いた陽電子研究では、1980 年代後半から電子加速器やイオン加速器を用いた低速陽電子ビームの発生・制御・計測技術ならびに材料評価への利用研究が進展した。この分野では日本が海外をリードしており、研究の進展に原子力クロスオーバー研究が果たした役割は大きい。

加速器ベースの陽電子ビームによって、高機能材料で重要な表面や薄膜の極微構造の評価が可能になったことから、材料開発に積極的に利用する動きが出てきている。一つ例を挙げれば、1999 年の国際半導体テクノロジーロードマップには次世代半導体 LSI 用の膜材料開発においてブレークスルーをもたらす可能性のある評価技術として陽電子消滅法が掲載され、民間企業が注目し、民間企業との共同研究等の産学官連携が増えてきている。このロードマップに掲載された陽電子による薄膜のナノ空孔評価は 1991 年電総研(当時)が加速器による低速陽電子ビームで世界で初めて成功したものである。

また、p.2-13 の第 2-2 表に、陽電子の利用(加速粒子:e+, 種類:電子リニアック,エネルギー >10 MeV, 手法:低速陽電子ビーム, 内容:表面薄膜材料極微構造評価, 格子欠陥の同定)の項目の追加を希望します。

前段

後段

(回答)

前段のご意見については、意見No. 7 と纏めて回答いたします。(8 ページ参照)

後段のご意見については、意見No. 8 と纏めて回答いたします。(9 ページ参照)

【No. 5】

(概要)

第1章の記述の中に、重要な二次粒子ビームの一つである陽電子ビームの記述を加えて(アンダーライン)いただきたい。

(意見)

「加速器の現状と将来(案)」には、各所に二次粒子の記述がなされています。その例として放射光、中性子ビーム、ミュオンビーム等が列挙されていますが、加速器を基礎にしてビームの発生と制御および応用の研究が精力的に行われている陽電子ビームは含まれていません。陽電子ビームも金属、半導体あるいはポリマーの表面の深さ方向解析の有力なプローブとして期待されています。加速器の必要性を広く理解いただくために、次のように陽電子関連の記述の追加を提案いたします。

(i) (1-1 ページ第3段落4行目)

「加速器から得られる中性子、ミュオンビーム、陽電子ビームによる物質・生命科学研究も始まり」(注) 陽電子は電子加速器からも得られるので単に加速器としました。

(ii) (1-3 ページ第1段落4行目)

「さらにサイクロトロンを用いたイオン利用や陽電子断層撮影(PET)などの医療装置」

(iii) (1-3 ページ第4段落8行目)

「加速器で得られる高エネルギー放射線やさまざまな粒子線および高出力レーザー光による…」

(回答)

表現を明確にするため、ご指摘をふまえ以下のとおり加筆・修正いたします。

(1) 1 - 1 ページ 3 段目 4 行目

・・・また、陽子加速器から得られる中性子ビームやミュオンビーム、電子加速器やイオン加速器から得られる陽電子ビームによる物質・生命科学研究も始まり、・・・

(2) 1 - 3 ページ 1 段目 4 行目

ご指摘の通り修正いたします。

(3) 1 - 3 ページ 4 段目 8 行目

ご指摘の通り修正いたします。

【No. 6】

（概要）

第2章の記述の中に、加速器利用の重要性を深く理解いただくために重要な二次粒子ビームの一つである陽電子ビーム等の記述を追加していただきたい。

（意見）

加速器利用の重要性を理解いただくためには、加速器を利用して精力的に行われている研究を正確に紹介する必要があります。加速器の必要性を広く理解いただくために、次のように記述の追加（アンダーライン）を提案いたします。

(1) (2-4 ページの「(3)加速器を使った物質研究」の 1 行目)

「放射光、中性子ビーム、ミューオンビームおよび陽電子ビームを用いた研究の主力は……」

（回答）

表現を明確にするため、ご指摘をふまえ修正いたします。

【No. 7】

(概要)

「第2-1表 加速器の種類」および「第2-2表 加速器利用のまとめ」を本文の記述に沿って充実させていただきたい。

(意見)

「第2-1表 加速器の種類」および「第2-2表 加速器利用のまとめ」には、加速器を基礎にしてビームの発生と制御および応用の研究が精力的に行われている陽電子ビームは含まれていません。陽電子ビームは金属、半導体あるいはポリマーの表面の深さ方向解析の有力なプローブとして期待されています。加速器の必要性を広く理解いただくために、「第2-1表」および「第2-1表」()次のように陽電子関連の記述の追加を提案いたします。

(i) 「第2-1表」

「高周波電界」、「円形加速器」、「静磁界」、「サイクロトロン」の「主な用途」、「原子核、医学利用(PET、照射) 照射、陽電子源」

(ii) 「第2-1表」()

「広い科学技術分野の研究における先端的基盤研究装置」、「(研究課題) 陽電子線、(加速粒子) e⁻、(加速器の種類) 電子リニアック、(エネルギー) ~1GeV、(主な実験手法) 陽電子消滅、(研究内容) 半導体格子欠陥」

(回答)

表現を明確にするため、ご指摘をふまえ修正いたします。

意見No. 4(後段)及び意見No. 7()については、内容が同様のものであることから纏めて回答いたします。2 - 13ページ「第2 - 2表」の「広い科学技術分野の研究における先端的基盤研究装置」につきましては、ご指摘をふまえ以下のとおり加筆・修正いたします。()については原文のまま記載しておりますが、該当部分は「第2 - 2表」となります。)

(研究課題)陽電子の利用

(加速粒子)e

(加速器の種類)電子リニアック

(エネルギー)10MeV ~ 1GeV

(主な実験手法)低速陽電子ビームによる陽電子消滅法

(研究内容)表面・薄膜材料極微構造評価、格子欠陥の同定

【No. 8】

(概要)

「加速器の現状と将来(案)」3.2 「広い科学技術分野における先端的基盤研究」(d)「陽電子・ミュオンビームの利用」(3-7 ページ)の陽電子に関する記述を以下のように差し替えて頂きたい。

(意見)

差し替えを希望する文章は以下の通りです。

「陽電子は物質中の 欠陥を知ることができる。」

「加速器によって生成された RI を陽電子線源とした陽電子消滅法により、金属フェルミ面、格子欠陥あるいは金属や半導体の不純物の析出のメカニズムの解明が行われ大きな成果が得られている。低速陽電子ビームの実現によって短パルス化、収束、エネルギー等の制御が可能となり、陽電子の利用範囲は飛躍的に広がった。高強度の低速陽電子ビーム発生のために、電子加速器やイオン加速器が利用される。陽電子は、正の電荷を持つ粒子であること、物質中の電子との消滅線を検出すると陽電子の消滅したサイトの情報が得られることから、機能性材料開発のユニークなプローブとして期待される。1999 年の国際半導体テクノロジーロードマップには、次世代半導体 LSI 用の新しい膜材料開発においてブレークスルーをもたらす可能性のある評価技術として陽電子消滅法が紹介された。各種高機能材料で重要な表面や薄膜の極微構造の評価が陽電子ビームで可能になったことから、産業界も注目するようになり、民間企業との共同研究等、産学官連携研究が増えている。加速器による高強度陽電子ビームの発生・制御・計測技術ならびに物質評価への応用研究の分野では、日本が海外をリードしている。」

(回答)

ご意見 No. 3、No. 4 (前段) 及び No. 8 については、内容が同様のものであることから纏めて回答いたします。

「陽電子」と「ミュオン」に関しては、ご指摘をふまえ 3 - 7 ページ「(d)「陽電子・ミュオンビームの利用」」を下記のように加筆・修正いたします。

d) 陽電子ビームの利用

陽電子は物質中では電子と対消滅を起こし、主に二つのガンマ線 (511keV) を反対方向に放出する。この消滅ガンマ線の放出時刻、エネルギー、角度分布などを高精度で計測して、電子の運動量分布や物質のミクロな構造を知ることが出来る。この陽電子消滅法によって金属フェルミ面や格子欠陥、金属や半導体の不純物析出のメカニズムの解明などが可能になった。

当初、陽電子線源として放射性同位元素を用いていたが、低速陽電子ビームが実現してその短パルス化、収束、エネルギー等の制御が可能になるとともに加速器や原子炉を用いた陽電子ビーム発生技術の進歩により、陽電子の利用範囲は飛躍的に広がった。我が国は、とくに加速器による高強度低速陽電子ビームの発生・制御・計測技術や物質評価への利用

で、世界をリードしている。1999 年の国際半導体テクノロジーロードマップには、次世代半導体 LSI 用の新しい膜材料開発でブレークスルーをもたらす可能性がある評価技術として取り上げられ、産業界も注目するようになり、産官学連携研究が活発になっている。

e) ミュオンビームの利用

ミュオン(μ)は電子の仲間(レプトン)で、正の電荷を持つミュオン(μ^+)と負の電荷を持つミュオン(μ^-)がある。ともにスピンと磁気能率を持っていて、 μ^+ (μ^-)は 2.2 マイクロ秒の寿命でそれぞれ陽電子(電子)と 2 つのニュートリノに崩壊する。その際、陽電子(電子)は μ^+ (μ^-)のスピン方向に強く出るので、スピンの向きを検出するのに陽電子(電子)を測定する。

高エネルギー陽子を原子核(実際にはベリリウムや炭素の原子核を用いる)に衝突させるとパイ中間子 π^+ (π^-)が放出され、それが崩壊して μ^+ (μ^-)になる。このミュオンは 100% 偏極しているので、ミュオンビームを物質中に注入して磁気共鳴(resonance)やスピン方向の回転(rotation)あるいは偏極の減少(緩和、relaxation)を測定すると、他の方法では知り得ない物質の性質あるいは内部状態を調べることができる。この 3 つの方法を纏めて μ SR と呼んでいる。

μ SR は 1970 年代の初期に開発された研究手法であるが、わが国の研究グループがアメリカの加速器を用いてパイオニア的働きをしている。今日ではミュオン利用の研究は、カナダの Triumf、イギリスの ISIS、スイスの PSI、日本の KEK-PS などで行われているが、ISIS のミュオン実験施設は日英協力で建設された。