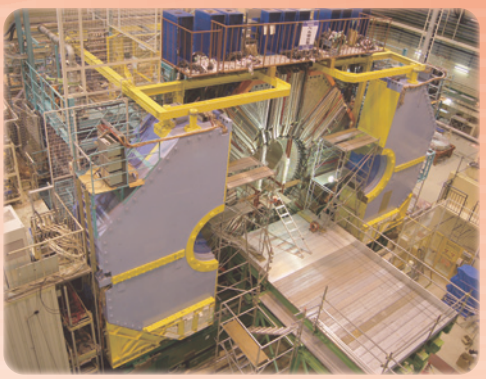
FOUNDATION FOR HIGH ENERGY ACCELERATOR SCIENCE

FASだより

2018.04 第16号



公益財団法人
高エネルギー加速器科学研究奨励会

■　広報誌「FAS だより」第 16 号の発行に当って　■

●　賛助会員の皆様には益々ご清栄のこととお慶び申し上げます。
　日頃より、当公益財団法人　高エネルギー加速器科学研究奨励会に対する格別のご協力を頂き、心から厚くお礼申し上げます。

●　広報誌「FAS だより」も公益財団法人に移行してから第 16 号を発行することになりました。

●　加速器セミナーおよび特別講演会のテーマ等でご希望・ご要望等がありましたら奨励会事務局までお寄せください。

●　賛助会員の皆様で、広報誌「FAS だより」に投稿したい高エネルギー加速器に関する記事等がございましたら是非お知らせ下さい。投稿をお待ちしております。

●　当公益財団法人の「ホームベージ」・広報誌「FAS だより」等をご覧いただき、より良いものにするために皆様のご意見をお寄せください。お待ちしております。

●　賛助会員のバナー広告掲載について
　当公益財団法人のホームページ上に賛助会員様のバナー広告を掲載しております。
　バナー広告掲載を希望される賛助会員様は、ぜひご利用ください。（無料）

＜連絡先：info@heas.jp 又は TEL/FAX 029-879-0471 ＞

公益財団法人　高エネルギー加速器科学研究奨励会　事務局

ＦＡＳだより　第１６号　目次

平成 30 年 4 月

1.　国際交流助成報告

1）　International Workshop on Physics with Positrons at Jefferson Lab（JPos17）
における招待講演（米国　シェファーソン研究所）自 29.9.12　至 29.9.15…… 1
高エネルギー加速器研究機構　物質構造科学研究所
ダイヤモンドフェロー　兵頭　俊夫氏

2）　イオン源国際会議参加（17th International Conference on Ion Sources セルン・ジュネーブ）
自 29.10.15　至 29.10.21…… 7
高エネルギー加速器研究機構　加速器研究施設　助教　柴田　崇統氏

3）　米国・CERN・日本・ロシア加速器スクール 2017
（国内、葉山・高エネルギー加速器研究機構）自 29.10.16　至 29.10.26…… 14
高エネルギー加速器研究機構　加速器研究施設　教授　山本　尚人・道園　真一郎

4）　UTTAC における Lamb シフト型編極イオン源の再構築と研究開発（韓国　大田市）
自 29.10.16　至 29.10.20…… 18
筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門　助教　森口　哲朗氏

5）　アジア加速器用超伝導・低温技術スクール（国内、高エネルギー加速器研究機構）
自 29.12.10　至 29.12.17…… 21
高エネルギー加速器研究機構　加速器研究施設　教授　仲井　浩孝氏

2.　その他の助成報告
レクチャー＆コンサート「科学と音楽の饗宴 2017」開催報告…… 26
（国内　つくば市ノバホール）　29.11.19　高エネルギー加速器研究機構共催

3.　公益財団法人　高エネルギー加速器科学研究奨励会　奨励賞（西川賞・小柴賞・
諏訪賞・熊谷賞）について（平成 29 年度）…… 28
1）　小柴賞　NO.1　初井　宇記氏報告…… 33
2）　小柴賞　NO.2　小嶋　健児氏報告…… 38

3） 諏訪賞　　新井　康夫氏・倉知　郁生氏報告 …… 42
4） 熊谷賞　　矢ヶ﨑　文昭氏報告 …… 49
5） 奨励賞受賞に関する科学新聞記事（30.02.23 付） …… 54

4. 公益財団法人　高エネルギー加速器科学研究奨励会奨励賞候補者募集要綱
（平成 30 年度）について …… 55

5. 平成 30 年度（2018 年度）　事業計画書について …… 58

6. 平成 30 年度（2018 年度）　収支予算書（損益計算書）について …… 62

7. 公益財団法人　高エネルギー加速器科学研究奨励会　賛助会員一覧
（平成 30 年 4 月 2 日現在） …… 64

8. 公益財団法人　高エネルギー加速器科学研究奨励会　評議員・役員等一覧
（平成 30 年 4 月 2 日現在） …… 65

■国際交流助成報告　1）

International Workshop on Physics with Positrons at Jefferson Lab（JPos17）における招待講演

高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所
兵頭　俊夫

2017年9月12日から15日まで米国のジェファーソン研究所（JLab）で開催されたInternational Workshop on Physics with Positrons at Jefferson Lab（JPos17）より招待を受けて、講演を行った。

JLabでは、12GeVのContinuous Electron Beam Accelerator Facility（CEBAF）とよばれる超伝導リニアックで加速したスピン偏極電子ビームによる原子核や核子の研究を行っている。また、自由電子レーザー（JLab FEL）を用いた研究も行っている。

最近、核物理分野で、偏極／無偏極陽電子を生成して、深い仮想コンプトン散乱によるパートン・イメージング、電子散乱における2光子交換、および、高エネルギー陽電子を用いたダークマターの探求などへの関心が高まっている。JLabではこれらに関連する研究を可能にするための陽電子ビームラインの建設の提案を検討して、連続電子ビーム加速器施設（CEBAF）を利用するJLab電子・イオン衝突器（JLEIC）の建設を計画している。

一方で、JLab-FELを利用した大強度低速陽電子実験施設を建設する提案の検討が、2013年に米国の低エネルギー陽電子コミュニティからJLabに提出された。JLabの評価委員会で評価をした結果、そのままでは不十分で、むしろJLab-FEL施設と緊密に協力してもっと大きな予算を請求するための検討を開始するのがよい、というアドバイスを得ている。

今回のワークショップは、可能ならば高エネルギー実験と低エネルギー実験の施設の両方を組み合わせた提案をするための、最初の作業であったと思われる。先ず、このワークショップの報告書を作り、それを元に計画の白書を作る作業の中で予算申請の形を模索しようという感じであった。

したがって、エネルギーを問わず偏極陽電子及び無偏極陽電子ビーム実験の新しい提案をするための幅広い議論を目的としていた。その中には、低速陽電子を用いた物性物理学や原子・分子物理学実験への応用も含まれており、KEKの状況をPlenary Talkで話すようにということだった。

高エネルギー領域の原子核物理でも、電子入射の実験に加えて反粒子である陽電子入射の実験をして結果の比較することで、見えてくるものがあるようだ。すなわち、高エネルギー領域では、電荷に依存した相互作用（クーロン補正）について、電子と陽電子を比較することにより、電子だけでは解析が難しい問題の解決に近づけるという。さらに偏極ビームを用いることでも情報量が増えるようである。

高エネルギーの偏極陽電子ビームは、円偏光のレーザービームをGaAsカソード等に照射して、出てくる偏極電子ビーム加速して重金属ターゲットにあてることで得られる。すなわち偏極した制動放射が発生し、それからの対生成で生じる陽電子も偏極している。

ところが残念なことに、その偏極を保った低速陽電子を得ることは難しい。通常の（我々がKEKで用いている）方法で低速化すると偏極がなくなってしまう。陽電子の初期エネルギーが対生成の閾値1MeVより遙かに大きいので、対生成のカスケードが起こり、スピンが電子に渡されてしまうのである。低速化した後で偏極させる以外にないが、その方法がないわけではないという議論もあった。ちなみに、放射性同位体のβ^+崩壊からの陽電子は最大エネルギーがせいぜい2MeV程度なので、減速中に減偏極する割合は低い。

ワークショップは丸3日かけてさまざまな分野の講演があった。大部分はJLabの装置の改良やそれを用いた原子核実験の可能性の講演で、その中に2割程度、外部の研究者からの低速陽電子実験の現状と将来の可能性の講演があった。

筆者は、低速陽電子実験の有用性を示す情報として、KEK 物構研の低速陽電子実験施設の実験装置と最近の成果について講演した。以下、その内容を紹介する。

当施設は、専用の～ 50 MeV リニアックによって生成されたエネルギー可変（0.1 ～ 35 keV）低速陽電子ビームを共同利用に供している [1, 2, 3]。くり返し 50Hz の短パルスモード（幅 1 ～ 12ns、可変、5 × 10^6 e^+/s）と長パルスモード（幅 1.2 μs、5 × 10^7 e^+ /s）の動作モードがある。～ 50 MeV に加速された電子を Ta 板に入射すると制動放射 X 線からの対生成で陽電子が得られる。

その高エネルギー陽電子をエネルギーのそろった低エネルギービームにする効率のよい方法がある。それは、陽電子対して負の仕事関数を持つ金属を減速材として使う方法である。

あまり知られていないが、陽電子と電子の対消滅断面積は、原子物理学や固体物理学の散乱現象の断面積に比べて非常に小さい。エネルギーが下がると大きくなる傾向があるが、熱エネルギー程度になってもまだ100万分の1程度と考えてよい。すなわち、固体中に入射された陽電子は電子と衝突をくり返して電子にエネルギーを与え続けている間は対消滅することはなく、その固体と熱平衡に達して（熱化して）から消滅する。

ちなみに、陽電子消滅法という物性測定技術は、対消滅する際の陽電子のエネルギーは熱エネルギー程度なので、放出される γ 線は主に電子状態の情報をもっていることを利用している。

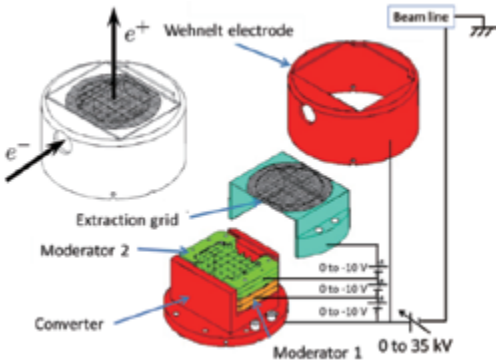


Fig. 1　加速された電子から陽電子を生じる converter と低速陽電子を得る減速材（moderator）。

そのように固体中で熱化した陽電子は消滅するまで熱拡散を続けるのであるが、不純物や格子欠陥の少ない結晶の中ではその拡散距離は 100nm に及ぶ。そのため一部の陽電子は表面に戻ってくる。

もしその固体がタングステン（W）、銅（W）、ニッケル（Ni）などの、陽電子に対して負の仕事関数をもつ金属であると、表面に戻ってきた陽電子は自然に放出される。

我々は減速材として陽電子仕事関数が -3 eV の W の薄膜を減速材に使っている。高エネルギー陽電子は、W 薄膜内で熱化された後に、負の陽電子仕事関数で決まる 3 eV でエネルギー幅が熱エネルギー程度の質のよいビームとして再放出される。これを加速して作られるのが「低速陽電子ビーム」であり、単に低速の陽電子ビームという意味でないことは強調に値する。

我々の施設では W 薄膜減速材に 100 V から 35 kV までの任意の電圧をかけることで、50 eV から 35 keV までの所望のエネルギーのビームを得ている（Fig. 1）。加速されたビームは磁気的に輸送される。

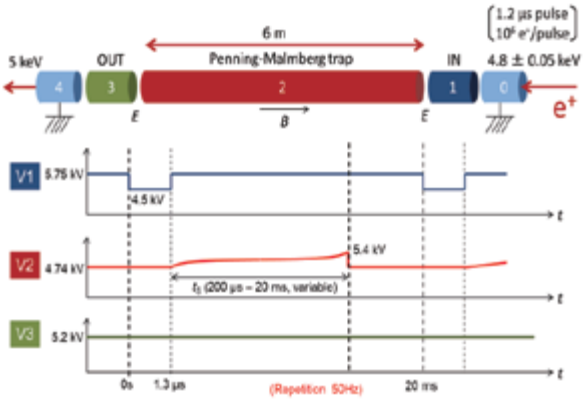


Fig. 2　パルス伸張部。1.2 μs 幅のパルスを 200 μs ～ 200ms の任意の幅に伸ばした 5 keV のパルスに伸長する。

ロングパルスモードの幅 1.2 μs の低速陽電子パルス中には 10^{12}/s に相当する陽電子が含まれるので、実験によっては信号のパイルアップが起きて不便である。そこで、測定ステーションに至るまでのビームライン途中に。パルス伸張部を設置している。現在は 5 keV に固定したビームエネルギーで 200 μs から 20ms までの任意の幅に伸張させることができる（Fig. 2）。現在は、伸張されたビー

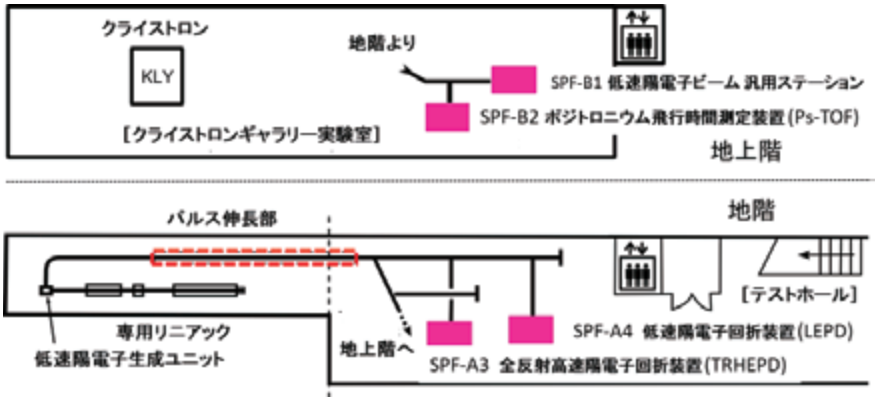


Fig. 3　低速陽電子実験施設（電子・陽電子入射器棟内）のビームラインと実験ステーション。

ムを、LEPD（低エネルギー陽電子回折）システムの位置検出遅延線検出器（DLD）を正しく動作させるために用いる。また、将来、511keV の消滅 γ 線の分析や、陽電子寿命測定のための短パルス生成システムの構築にも使用される予定である。

測定領域まで導かれた低速陽電子ビームは、同じ階（地階）の分岐 SPF-A3、SPF-A4 と、階上（地上階）の SPF-B1、SPF-B2 に分岐される（Fig. 3）。これらは同時には使用できず、ビームタイム毎に切り替えられて別のユーザーが使用する。

（1）SPF-A3 には、全反射高エネルギー陽電子回折（TRHEPD、トレプト）ステーションが接続されている。TRHEPD は、反射高エネルギー電子回折（RHEED（リードまたはアールヒード）の陽電子版であるが、電子よりも高い表面選択性がある [3]。それは、すべての物質の内部の静電ポテンシャルが正であるために、電子は物質内部に引き込まれるが、陽電子は反発されることによる。TRHEPD では、5°程度以下の視射角（入射方向を表面から測った角度）で陽電子を表面に入射するが、運動エネルギーの表面に垂直な成分が内部のポテンシャル・エネルギーより低いと全反射されるので、回折パターンは最表面の原子配列だけの情報をもたらす。また、視射角が全反射の臨界角より大きくなると、陽電子は結晶内に侵入するが、表面に近づくように屈折するので、最表面の直ぐ下から、順に深くまでの情報を得ることができる [4]。これは、視射角が小さくても表面か数層の原子配置を同時に見てしまう RHEEED に比べて、解析が圧倒的に簡単で高精度になる。TRHEPD は、測定角度範囲内に全反射角度領域と侵入角度領域が同程度存在する唯一の回折計測手段である。

この TRHEPD の非常に高い表面感度を活かして、我々は、この数年間に、さまざまな成果を挙げてきた。例をいくつか挙げる。

たとえば、発見されてから 10 年間原子配列の詳細が明らかでなかった Ge（001）（4×2）-Pt 原子ナノワイヤの構造を決定した [5]。また、構造が決まらず 30 年間議論の対象となっていたルチル型 TiO_2（110）（1×2）の表面原子配列を決定した（Fig. 4）[6]。

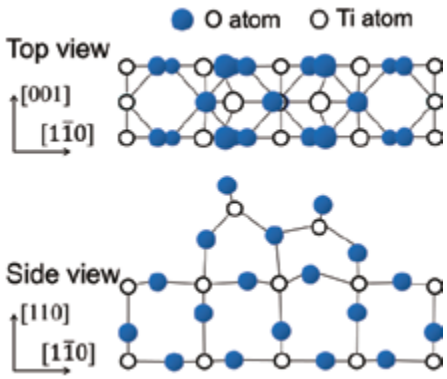


Fig. 4　TRHEPD で 30 年間の議論に決着をつけた確定した光触媒ルチル型 TiO_2（110）（1×2）表面の原子配列 [6]。

さらに、最近行っている単原子層物質の構造解析について少し詳しく述べる。炭素の単原子層物

質であるグラフェンの単離やその基板上の合成が可能になって以来、同じく周期表の 14 族元素であるシリコンやゲルマニウムの単原子層物質（それぞれシリセン、ゲルマネンと呼ばれる）の合成も実現され、次世代の省エネルギー・高速電子素子実現の期待から、盛んに研究されている。グラフェンは平面状であるが、シリセンやゲルマネンにはバックリング（凸凹構造）があるという理論予想があった。これは炭素にはグラファイトという層状物質があるが、シリコンやゲルマニウムはダイアモンド構造しかないことから、大いにあり得ることである。また、理論は、基板の種類によって基板と原子層物質の距離やバックリングの大きさ異なり、それらが電子状態やその他の性質に影響していると予想している。

したがって、基板と単原子層物質の距離や、バックリングの有無やその大きさを直接測定することは重要である。TRHEPD はまさにそのようなデータを提供することのできる手段である。

先ず、Ag（111）表面上にシリセンを形成する方法が開発されると、早速 TRHEPD で基板との距離とバックリングの大きさを測定した。結果は理論の予想と良く合った [7]。次に、貴金属や単純金属の基板上のグラフェンと遷移金属基板上のグラフェンは基板との距離が大きく異なるという予想があった。そこで、Cu（111）表面上と Co（0001）表面上のグラフェンの構造を解析したところ、確かに大きく異なり、共にバックリングはなく平面状だった（Fig. 5）[8]。また、さらに最近ゲルマネンも合成できるようになった。早速 Al（111）表面上にゲルマネンを合成して構造を調べたところ、理論の予想と異なることが分かった [9]。理論では単位胞内の 2 個の Ge 原子が外の原子より飛び出した形のバックリングが予想されていたが、もしそうなら（110）方位から入射した場合の（1/3 -1/3）スポットと（-1/3 1/3）スポットのロッキング曲線が同じ形であるはずであるが、測定したところ、それらは互に異なり、しかもどちらも理論予想とは異なった。そこで、単位胞内の 1 個の Ge 原子のみが飛び出しているモデルで計算したところ、実験を良く再現した。すなわち、TRHEPD の測定から、正しい構造を決定した。

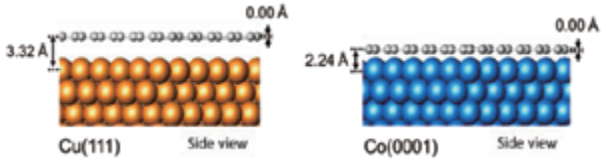


Fig. 5　TRHEPD で決定した Cu（111）基板表面と Co（0001）基板表面のグラフェン。共にバックリングがないことと基板との距離が大きく異なることを示した [8]。

（2）最近 SPE-A4 分岐に低速電子回折（LEED、リード）の陽電子版である低速陽電子回折（LEPD、レプト）ステーションを完成し、Ge（001）（1 × I）面からの回折パターンを測定した。現在、LEED の専門家の Tong 氏が提唱する陽電子回折ホログラフィ法 [10] をこの表面の構造解析で試して見るための測定を続けている。

（3）SPF-B1 分岐は、汎用ステーション分岐である。これまでは、ポジトロニウム負イオン（Ps^-）ステーションが接続されていた。Ps^- はヒドリドイオン（H^-）において陽子が陽電子に置き換わったもので、純粋な 3 個のレプトンのみから成る束縛系である。電子と陽電子の仕事関数および Ps^- の束縛エネルギーの値から、W 表面は Ps^- 放出の条件を満たすがその量は 0.05 % と極めて低かった。しかしこの表面にアルカリ金属を 1 原子層以下蒸着すると放出量は 1.5 % に増加する [11, 12]。これは低速陽電子や電子のポジトロニウム（Ps）の放出量に比べて 1 桁しか小さくなく、このエキゾチックな粒子の生成量としては驚くべき多量である。

この Ps^- の電子の 1 個をレーザー光で脱離してこのイオンを中性のポジトロニウム（Ps）にすることができる [13]。さらに、電荷をもっている Ps^- を静電場で加速してから光脱離するという方法で、エネルギー調節可能な Ps ビームを生成できる [14]。Ps^- は束縛エネルギーが小さいので安定な励起状態は存在しないが、光脱離過程にフェシュバック共鳴と形状共鳴のピークがあるとする理論予想がされていた。1Po 対称性をもつ形状共

鳴が Ps の不安定な励起状態（n = 2）形成の閾値近傍で生じるのでそこを狙った光脱離を観測したところ、断面積が予想通りのエネルギー依存性で大きく増加した（Fig. 6）[15]。この実証は、Ps 分光における画期的な成果と評価されている。

Ps^- イオンの実験はその後、東京理科大の実験室におけるトラップ型低速陽電子ビーム装置で行われている。この汎用ステーションにで、Ps のボース・アインシュタイン凝縮（BEC）の実現に必須と考えられている Ps のレーザー冷却実験が開始された。

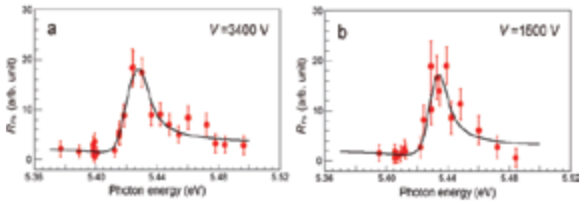


Fig. 6　ポジトロニウム負イオンの光脱離における形状共鳴のデータ（丸印）と理論（実線）[15]。

（4）SPF-B2 分岐にはポジトロニウム飛行時間（Ps-TOF）ステーションが接続されている。このステーションは低速陽電子実験施設がまだ高エネルギー実験や放射光実験とリニアックを共有していた 1990 年代に水晶から 2 種類のエネルギーの Ps が放出されていることを示した [16] ステーションを改造したものである。

試料が金属の場合、バルク部分ではクーロン遮蔽のためにポジトロニウムが生成しないことが知られているので、放出された Ps-TOF で測定された運動エネルギー分布は、表面の電子状態に情報を与える。

上に述べたアルカリ金属蒸着による Ps^- イオンの生成量増大はアルカリ金属によるよく知られた電子仕事関数の減少（陽電子仕事関数の増加）が関係しているのではないかと考えられる。すなわち電子と陽電子に対する効果は互いに打ち消し合うが、Ps^- ではその数が 2:1 なので効果が残ると考えられる。そうであれば、Ps の生成量には影響がないのではないかと予想される。そのような動機で測定したところ、予想に反して Ps 放出量の大幅な増大が見られた [17]。清浄表面の 3 倍以上であるが、清浄表面からの放出量は 25％程度であることが知られているので、これは、表面に戻ってきた陽電子のほとんどが Ps として放出されていることになる [19]。

統一的な解釈はこれからであるが、Ps^- の放出量増加に対する仕事関数の効果を否定するものではない。実在金属中には Ps は形成されないが、自由電子密度がさらに低ければ Ps が生成するだろうと予想されている。この実験の単原子層以下のアルカリ金属の蒸着でその条件が満たされている可能性がある。定性的には、Ps の生成増加と電子仕事関数の低下の共存のために、Ps^- イオンの生成が大幅に増加したのではないかと考えられる。

この実験でさらに興味深いのは、陽電子と電子の仕事関数で説明できる 5eV 程度の Ps 成分の外に、Ps 生成過程、あるいは生成後のエネルギー損失の結果を示す成分があることである。この解明も今後の課題である。

以上、KEK 物構研低速陽電子実験施設の低速陽電子ビームの生成と、4 つのステーションで行われている実験とその最近の成果について報告した。

謝辞

JPos17 ワークショップにおいてこのような発表をするための旅費をサポートして下さった、高エネルギー加速器科学研究奨励会（高﨑文彦代表理事）及び物質構造科学研究所山田和芳所長に心から感謝いたします。また、実験遂行に必要な甚大なサポートを下さった KEK 加速器研究施設入射器グループの設楽哲夫氏（現研究企画）、峠暢夫氏をはじめとする皆様方、同物構研放射光施設の柳下明氏、木村正雄氏をはじめとする皆様方、低速陽電子グループの和田健氏（現 QST）および望月出海氏、主な共同研究者である東京理科大の長嶋泰之氏と満汐孝治氏（現 AIST）及び長嶋研究室の皆様、JAEA の深谷有喜氏、QST の河裾厚

男氏と前川雅樹氏に心から感謝いたします。科研費基盤（S）24221006、基盤（S）24221007、若手（B）26800170、東レ科学技術研究助成、SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）の支援を受けました。実験は、PF 共同利用課題 2010S2-003、2010G652、2012G654、2013S2-005、2013U002、2013G694、2014S2-004、2014G636、2016S2-001、2016S2-006 で行った研究です。

文献

[1] K. Wada, et al., *Euro. Phys. J. D* 66, **37** (2012).

[2] K. Wada, et al., *J. Phys.: Conf. Ser.* **443**, 012082 (2013).

[3] T. Hyodo et al., *J. Phys.: Conf. Ser.* **791**, 012003 (2017).

[4] Y. Fukaya, et al., *Appl. Phys. Express* **7**, 056601 (2014).

[5] I. Mochizuki et al., *Phys. Rev. B* **85**, 245438 (2012).

[6] I. Mochizuki et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18**, 7085 (2016).

[7] Y. Fukaya, et al., *Phys. Rev. B* **88**, 205413 (2013).

[8] Y. Fukaya, et al., *Carbon* **103**, 1 (2016).

[9] Y. Fukaya, et al., *2D Materials*, **3**, 035019 (2016).

[10] S. Y. Tong, et al., Phys. Rev. Lett. **69**, 3654 (1992).

[11] 長嶋泰之，満汐孝治、日本物理学会誌 **67**, 333 (2012).

[12] Y. Nagashima, *Phys. Rep.* **545**, 95 (2014).

[13] K. Michishio, et al., *Phys. Rev. Lett.* **106** 153401 (2011).

[14] K. Michishio, et al., *Appl. Phys. Lett.* **100** 254102 (2012).

[15] K. Michishio, et al., *Nature Communications* **7**, 11060 (2016).

[16] Y. Nagashima, et al., *Phys. Rev. B* **58** 12676 (1998).

[17] H. Terabe, et al., *Surf. Sci.*, **641**, 68 (2015).

[18] T. Yamashita, et al., *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **387**, 115 (2016).

[19] S. Iida, et al., *J. Phys.: Condens. Matter* **28**, 475002 (2016).

イオン源国際会議（17th International Conference on Ion Source）参加

高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設
柴田　崇統

欧州原子核研究機構（CERN）主催にて、第17回イオン源国際会議（17th International Conference on Ion Source ; ICIS）が、スイス・ジュネーブ市内のCICG（Centre International de Conférences Genève）で、10月15日－20日の期間、開催された。申請者は、17th ICISに参加し、現在のJ-PARCイオン源と同じ放電形式の高周波放電型（RF; Radio Frequency）イオン源において、高密度の誘導結合型プラズマが正常に生成されていることを、ビーム加速することなく簡便に診断可能なツールを提案し、報告した。第1章では、本国際会議の概要を説明する。第2章では、会議で見かけた興味深い発表を紹介し、第3章では本発表内容を報告する。

1. 会議の概要

イオン源国際会議（ICIS）は隔年で開催され、今回で17回を迎える。近年では、2011年Giardini Naxos（INFN; 国立核物理学研究所、伊）、2013年Chiba（NIRS; 放射線医学総合研究所、日本）、2015年New York（BNL; Brookhaven国立研究所、米国）と続き、今回2017年はGevève（CERN主催）にて開催された。同会議は、粒子加速器を初めとする幅広い分野に関わる多種のイオン源について、応用・設計・研究開発に従事する研究者が各国から参加する世界最大の国際会議であり、例年250件程度の発表が寄せられる。

発表は衝突型加速器・核融合プラズマ加熱・医療応用・中性子源・材料加工などに応用されるイオン源のビーム大強度化、高輝度化、高電荷イオンビームの生成などに向け、イオン源内部のプラズマ診断手法の確立や、プラズマ挙動をするための数値モデリング・シミュレーション結果に関する報告が、今回数多く為された。

発表件数は、全体で293件（内、口頭発表47件、ポスター発表246件）と例年に比べて50件近く発表件数が増加した。参加者は一般が255名、学生が65名であり、内59％がアジアからの参加者である。近年は、アジアからの参加者の大部分は日本からの参加であったが、今回は中国からの参加者（CSNS; China Spallation Neutron Source、IMP; Institute of Modern Physicsなど）の割合が高い印象を受けた。

また、イオン源の種類についても、アーク放電型や高周波放電（RF）型のほか、電子サイクロトロン共鳴（ECR）型、レーザーイオン源、電子銃（EBIS）の発表が多く見られた。特に、ECRイオン源は元々理研やBNL、JYFL（ユバスキュラ大学、フィンランド）で主体的に開発が進められている重粒子加速器用のイオン源としての用途があるが、中国IMPでもXe加速実験の開始などに伴い、Heavy Ion Plasmaの生成効率が高い40 GHz以上の高周波によるECRイオン源に関する発表が、例年より多く見られた。

KEKと関連がある発表としては、J-PARC陽子加速器で利用される負水素（H^-）イオン源について、生成されたH^-の流束をプローブとレーザー光脱離により直接測定する手法に関する発表（NIFS; 核融合科学研究所、津守氏）が興味深いところであったため、次章で紹介する。他に、H^-の生成効率を維持する上で重要なセシウム（Cs）の挙動を理解するためのレーザー吸収分光と数値モデリングに関する発表（独IPP; Institut für Plasmaphysik、Fantz氏）も将来的に重要な技術となる。核融合分野では、アンペア級の大電流H^-ビームをレーザー光脱離により、中性の水素原子ビームに変換するためのover viewが発表された（CEA、Simonin氏）。レーザー光脱離は、イオン源プラズマの診断以外に、J-PARCなど陽子加速器においても核変換への応用など、ビーム診断・制御に重要なアプローチであると言える。

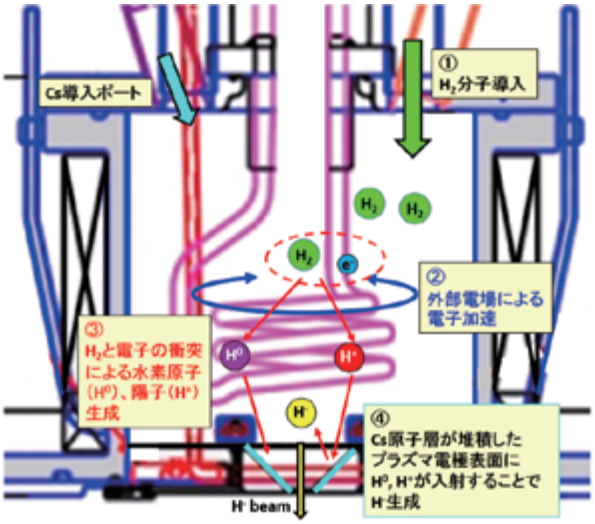


図１　表面生成型イオン源内の H- イオン生成過程

2. 国際会議で見かけた興味深い発表

H^- イオン源分野では、近年 1 – 2 年にかけて、プラズマ中の H^- 生成・引出しに関わる物理過程の挙動解明が大きく進んだ。その一例として、表面生成型（Cs 添加型）イオン源内で生成された H^- が引出し孔からビームとして出射されるまでの輸送過程を直接測定した発表が印象深い。

申請者が知る限りだが、2013 年ごろまで表面生成型イオン源における H^- イオンが生成されてからビームとして引き出されるまでの輸送過程は、定量的に理解、あるいは可視化されていなかった。2013 – 2014 年にかけ、慶応大学のプラズマシミュレーショングループ（畑山明聖教授ら）が、表面生成された H^- イオンが、電磁場による力と衝突過程を含めた 3 次元 PIC（Particle-In-Cell）シミュレーションから輸送過程の計算結果を示したことに端を発し、共同研究を行っていた NIFS の NBI（中性粒子ビーム入射）加熱グループ（津守氏、木崎氏）がレーザー光脱離とラングミュアプローブを組み合わせた DPLP（Directional Photo detachment Langmuir Probe）を用いて H^- の流束を直接測定した。

図 1 に示すように、表面生成型イオン源では H_2 ガスを充填した金属チャンバ内に電磁場を形成し、内部の電子を加速することにより電離を促して、水素プラズマを生成する。

プラズマ中の水素ガスは電子などと衝突して電離する以外に、水素原子（H^0）や陽子（H^+）に解離する。これらの粒子は、壁近傍の磁力線に捕捉される電子と異なり、引出し孔周囲のプラズマ電極（PE）に入射する（図 1 ④）。表面生成型のイオン源では、チャンバ内部に Cs を導入し、PE 表面に Cs の原子層が堆積するようにすることで、金属表面の仕事関数を低く保つ（J-PARC の場合は Mo 金属に対して Cs が堆積することで 1.5 eV 程度となる）。このような表面に H^0 や H^+ が入射することで、PE 内部の自由電子が移り、負イオン H^- が生成される。しかし、生成された H^- がビームとして孔から引き出されるまでの経路は、これまで明らかでなかった。DPLP を用いた H^- 流束測定では、図 2 のようにラングミュアプローブの先端に 4 極のチップが取付けられる。H^- 流束に垂直に挿入したプローブの各チップに対し、H^- 光脱離用の Nd;YAG レーザーを照射すると、各チップのレーザースポット径 R_L の範囲内では、光脱離により H^- 密度が減少するが、垂直に入射する H^- 流束により緩和時間 τ を経て、密度が定常状態に回復する。このことから、レーザースポット径を緩和時間で割った R_L/τ が H^- 流束の平均速度となる。4 つのチップで得られる平均速度の情報から、2 次元分布を導出することが可能である。

この方法により、イオン源内部で生成された H^- イオンは 20 mm 程度イオン源内部に向かって飛行してから、引出し孔に進行方向を変えてビー

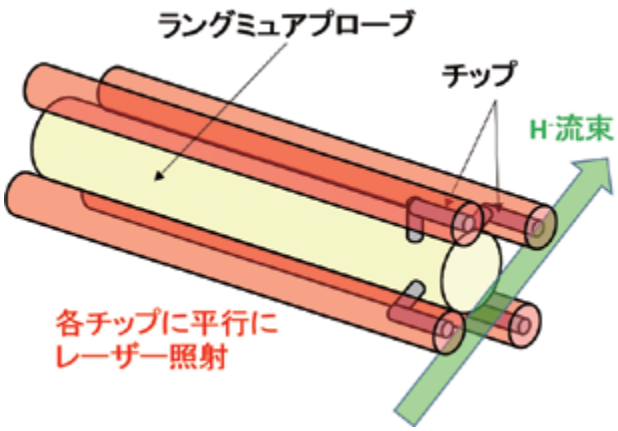


図２　DPLP 測定のイメージ

ムとして引き出される過程が、初めて実験的に示された。この手法・結果は、NBI に限らず、粒子加速器用のイオン源でも応用可能であり、更なる大強度化を目的としたイオン源引出し部構造の設計に指針を与えるものと考えられる。

3. 本発表内容

3.1. 概要

申請者は近年毎回 ICIS に参加しているが、最近は特に、加速器リニアック用の RF イオン源に対するプラズマ計測、および数値シミュレーションによる結果を報告してきた。

2012 – 2014 年にかけては、CERN LINAC4 で研究開発が進められる外部アンテナ方式の RF イオン源に対し、プラズマから発せられるバルマー系列（Balmer α, β, γ 線）の発光分光計測と、3 次元の PIC-MC（Particle-In-Cell Monte-Carlo）シミュレーションを実施し、RF プラズマの点火直後において生成される容量性電場とプラズマ粒子の輸送過程の関係から、上記発光線の時間変化に関する特徴を説明した。また、2015 年以降は、J-PARC リニアック用の内部アンテナ方式 RF イオン源（図 3）内で生成されるプラズマの数値シミュレーションモデルの開発を進めてきた。2016 年に STFC, CCFE 主催のもと Oxford にて開催された 5th International Symposium on Negative Ions, Beams and Sources（5th NIBS）では、数値モデルを用い、RF イオン源プラズマ点火後において、低密度の容量性プラズマ（E モード）から、高密度の誘導結合型プラズマ（H モード）へのモード遷移の背景にある物理機構を明らかにし、報告した。

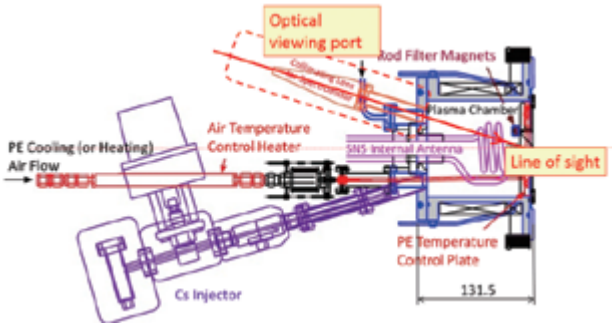


図 3　J-PARC RF イオン源

今回の発表は、J-PARC RF イオン源プラズマから発する Balmer α 線に対する分光計測を実施し、2016 年 NIBS で発表した計算結果と比較をすることで、一般的な RF イオン源についても、直接的に H モードのプラズマが実現しているかを診断可能なツールを開発したため、この詳細について報告した。H モードプラズマの診断技術により、J-PARC のような長期運転で利用されるイオン源が高パワーで運転される際、プラズマ安定維持の直接監視が可能となるほか、一般的な RF イオン源の新規設計時には、ビーム加速のための高圧機器を必要とすることなく、プラズマが正常に立ち上がることを検証することが可能となる。

3.2. 研究背景

J-PARC 素粒子実験、物質・生命科学実験での利用運転に向け、2014 年 9 月末から RF H^- イオン源の運転が開始された。2017 年の夏までには、電流値 40 mA、ビームエネルギー 50 keV、duty factor 1.25 %（0.5 ms × 25 Hz）、RMS エミッタンス 1.5 π mm mrad 以下の H^- ビームを連続して 1,845 時間引き出すことに成功した。このときのイオン源の寿命は、2.5 ヶ月以上と 2015 年時点の 1 ヶ月から大幅に延長した。

今後、イオン源の課題としては、3 ヶ月以上のメンテナンスフリー期間の実現とともに、リニアック下流部での 50 mA、60 mA 運転（イオン源直下ではそれぞれ 58 mA、68 mA）に向けた高パワー運転への設計検討が要求されている。

一度リニアックトンネルに据付けた RF イオン源は、利用運転の間、アクセス不可の状態となる一方、高パワー運転（入射パワー数 10 kW）の実施によるイオン源構成機器（アンテナコイルや永久磁石）の損耗が懸案事項とされる。また、RF イオン源内部のプラズマ状態を直接監視する方法が無いことから、イオン源プラズマの異常が発生した場合、下流部にある低エネルギービーム輸送（LEBT; Low Energy Beam Transport）通過後の変流器におけるビーム電流値で判断することとなる。そのため、異常個所の特定も困難となる。RF プ

ラズマからの Balmer 発光線は数少ない直接的な信号である。本発表では、RF 周波数（J-PARC の場合は 2 MHz）より高い時間分解能の光電子増倍管（PMT）による計測と、数値シミュレーション結果の比較により、イオン源内部に E モードと H モードいずれのプラズマが生成されているかを PMT 信号波形から判断可能であることを示した。

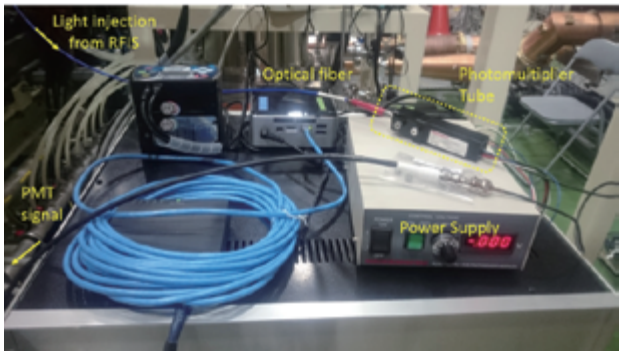


図 4　J-PARC RF イオン源の分光計測系

3.3. Balmer 線の発光分光計測

図 4 には、RF イオン源プラズマからの Balmer α 線を測定するための PMT 分光計測系の写真を示した。図 3 に示したように、J-PARC RF イオン源チャンバには、天板位置に中心軸から 16 度の角度で分光計測用のビューポート（optical viewing port）が取付けられている。ビューポートから光ファイバにて取り出されたプラズマからの発光は、Balmer α 線波長の周囲（656 ± 5 nm）のスペクトル成分のみを透過するバンドパスフィルタを介して、PMT（Hamamatsu; H10722-01MOD）に取り込まれる。図 5 には、RF イオン源からの H^- ビーム 1 shot を生成する際のプラズマへの入射パワー（RF アンテナへ印加する交流電流値；水色）と、PMT にて計測したプラズマからの Balmer α 線強度の時間変化（青色）を示した。図 5 の（a）は、1 shot のマクロパルス全体波形、（b），（c），（d）は、それぞれ、プラズマ点火直後、プラズマ密度成長後、マクロパルス終端における波形を表している。図 5 の横軸は須らく時刻を表しており、（a）のマクロパルスが 1.2 ms の幅を持つのに対し、（b）–（d）はフルスケールで 10 us の時間間隔を示して

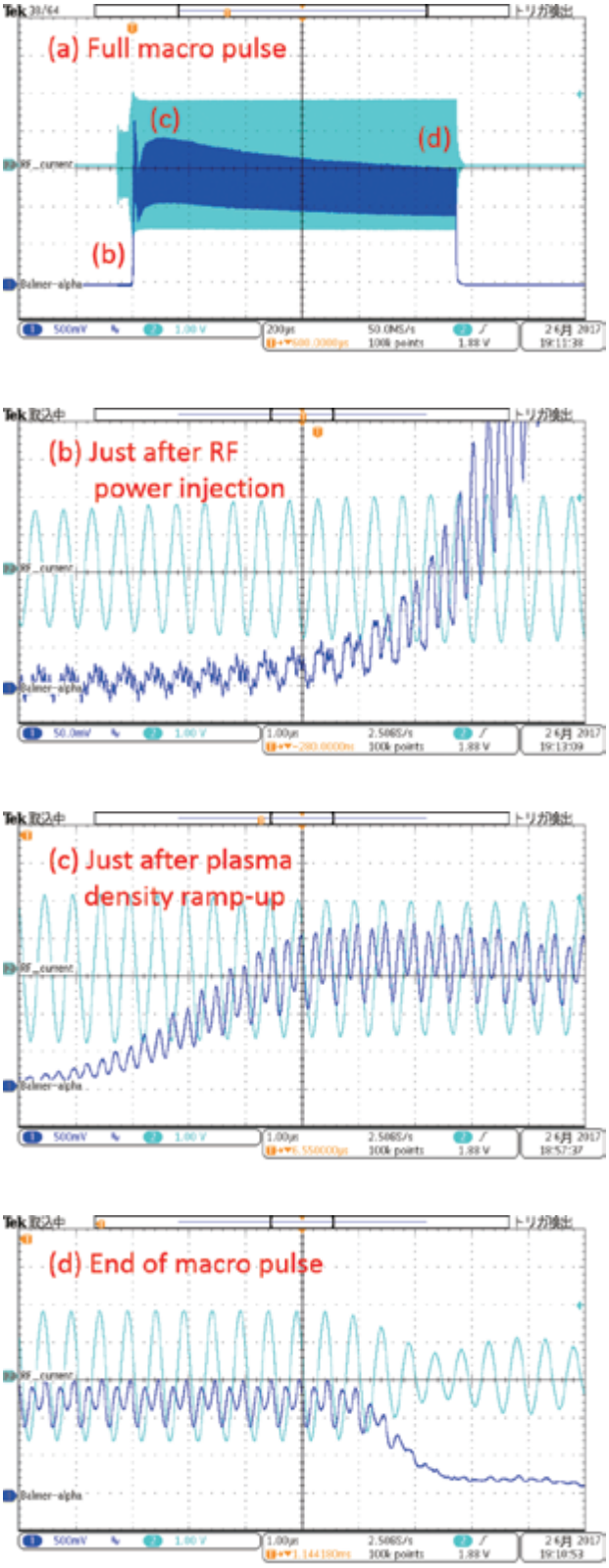


図 5　J-PARC RF イオン源へ入射する RF 電流値（水色）とイオン源から得られる Balmer α 線強度（青色）の時間変化。(a) はマクロパルス 1.2 ms 全体、(b)，(c)，(d) は、それぞれプラズマ点火直後、プラズマ密度成長時、マクロパルス終端の 10 us を表す。

いる。図 5（b）の前半における Balmer 線強度波形に注目すると、プラズマ生成開始直後の低密度状態では、水色で示した RF 電流値（2 MHz）と同じ周波数で振動している挙動が見られる。同図の後半に至ると、発光線強度のピークは 2 つに割れ、2 MHz の倍の 4 MHz での振動波形を示すようになる。以降、図 5（c），（d）においても、RF 入射電流の倍の周波数での振動が発光線強度に見られる。また、図 5（c）における Balmer 線強度の増加は、発光線の要因となる水素原子の電子衝突励起が促進されることに起因する。これは、電子密度（プラズマ密度）が高い状態にあると言える。高密度の（H モード）プラズマ状態と、4 MHz の発光線強度振動の物理機構を結びつける上でシミュレーションが重要な役割を果たす。

3.4. 数値シミュレーション

2016 年の NIBS では、J-PARC RF イオン源内のプラズマ（電子、陽子、H_2^+、Cs^+）に対し、3 次元の PIC-MC（Particle-In-Cell Monte-Carlo）モデルを構築し、その結果を報告した。今回の結果との比較する上で重要であるため、簡潔に説明する。

計算モデルでは、4 種類の荷電粒子の輸送過程（Boltzmann 方程式）

$$m_{\mathrm{j}}\frac{\Delta \mathbf{v}_{\mathrm{j}}}{\Delta t}=q_{\mathrm{j}}\left(\mathbf{E}+\mathbf{v}_{\mathrm{j}}\times\mathbf{B}\right)+\mathbf{F}_{\mathrm{inelas}}+\mathbf{F}_{\mathrm{CC}} \qquad (3\text{-}1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{x}_{\mathrm{j}}}{\partial t}=\mathbf{v}_{\mathrm{j}} \qquad (3\text{-}2)$$

を、空間内の容量性電場・誘導結合型電磁場分布（Maxwell 方程式）

$$\nabla\times\mathbf{B}=\mu_0\left(\mathbf{j}_{pl}+\mathbf{j}_{RF}\right)+\varepsilon\mu_0\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \qquad (3\text{-}3)$$

$$\nabla\times\mathbf{E}=-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \qquad (3\text{-}4)$$

と同時に逐次計算することで、各粒子種 j に対する位置 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{j}}$、速度 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{j}}$、および空間各位置における電場 $\boldsymbol{E}$、磁場 $\boldsymbol{B}$ を自己矛盾なく計算可能である。式（3-1）における $\boldsymbol{F}_{\mathrm{inelas}}$ および $\boldsymbol{F}_{\mathrm{CC}}$ は、それぞれ中性粒子（水素原子 H^0・分子 H_2）との弾性・非弾性衝突による運動量移行と、荷電粒子同士の衝突によるクーロン散乱による運動量移行を表す。また、式（3-3）中の $\boldsymbol{j}_{\mathrm{pl}}$ および $\boldsymbol{j}_{\mathrm{RF}}$ は、プラズマ電流と RF アンテナコイルに印加する交流電流である。

式（3-1），（3-2）は Leap-frog 法による差分計算時に、衝突による運動量移行を算出するために Null Collision Method、および Binary Collision Model という計算技法を用いている。また、式（3-3），（3-4）による誘導結合型電磁場は FDTD（Finite Differential Time Domain）法を用いて計算する。誘導結合型の他、アンテナコイルの一端に交流電圧を印加することで発生する容量性電場の影響は、Poisson 方程式

$$\Delta\phi=-\frac{\rho}{\varepsilon} \qquad (3\text{-}5)$$

を SOR（Successive Over Relaxation）法によって解くことで得られる各位置でのポテンシャル ϕ から導出する。上式の $\boldsymbol{p}$ は、絶縁体のアンテナコイル表面に蓄積した表面電荷を表す。

上記の方程式は、J-PARC RF イオン源の 3 次元構造、磁石配置を模した体系で計算される。図 6 には、イオン源形状、磁場構造を示した。

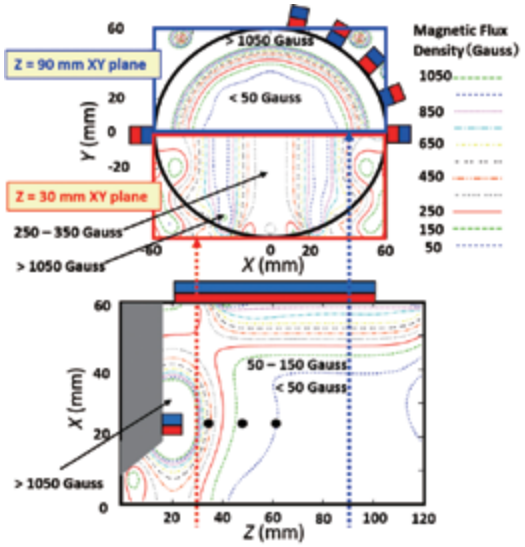


図 6　J-PARC RF イオン源におけるプラズマ閉じ込め用カスプ磁石・フィルター磁石配置、および磁石による磁場強度分布。X =0, Z = 0 位置はビーム引出し孔の中心を表す。Z < 17mm の灰色部分は、プラズマ電極（PE）である。X = 22 mm かつ Z = 35, 48, 61 mm にある黒丸は、プラズマに RF パワーを印加するためのアンテナコイル断面を示す。

上述のモデルを元に計算した、RF イオン源にパワーを印加した際のプラズマ密度の時間変化を図 7 下に示す。図 7 上はアンテナコイルに印加する 2 MHz の交流電流（図 5 の水色と同）の時間変化である。図 7 下の赤線が、Balmer 発光線の生成に重要な電子の密度を表している。電子密度に注目すると、プラズマ点火直後は 10^{16} – 10^{17} m^{-3} の間で緩やかに成長していたが、2 – 3 RF 周期後、電子密度は急増し、10^{19} m^{-3} 台に到達した後、2 MHz の交流電流の倍の周波数（4 MHz）で時間的に振動している。

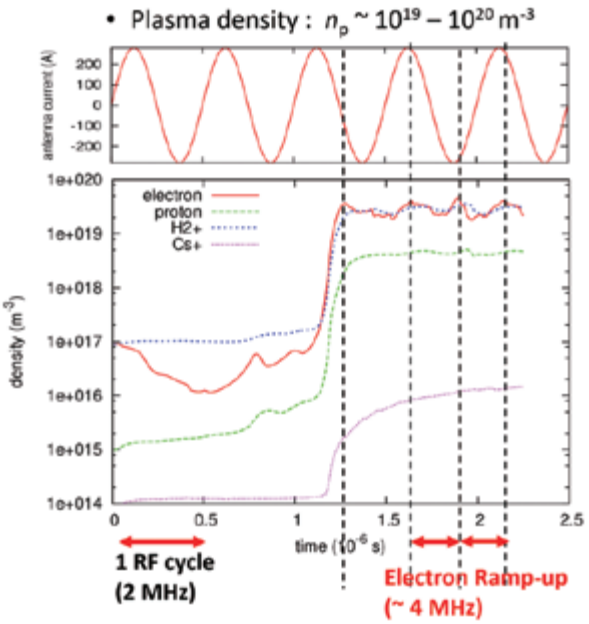


図 7　（上）RF アンテナコイルに印加される 2 MHz 交流電流の時間変化、（下）各粒子密度の時間変化。赤線は電子密度を表す。

このような RF 周波数の倍の周波数での電子密度の振動が起こる原因は、イオン源内部に生成される誘導結合型の磁場が、1 回の RF 周期の間に 2 度ピークを持つためである。図 8 (a) , (b) には、電子密度がピークを持つ時刻（図 7 下の t = 1.63, 1.88 × 10^{-6} s）において、イオン源内部に形成される軸（Z）方向磁場強度を示した。R = 0 は、イオン源中心軸に相当し、図の黄色は +Z 方向、黒色は -Z 方向に数 100 Gauss の強磁場が立ち上がることを表している。また、このときの電子密度分布を図 9 に示した。1 周期の間に正負方向に軸磁場が形成されると、磁力線に捕捉された電子は、イオン源中心軸付近に局在化するため、比較的に高密度の状態となる。一方、Z 方向磁場の極性が変化する間の時刻では、R 方向の電子ロスにより、密度が低くなる。2 MHz の間に、電子密度の局在化は 2 回起こるため、あたかも 4 MHz でプラズマ密度が振動しているように見える。このように軸方向に強磁場が生成し、（かつ周方向の電場が生成し）、プラズマが補足・加速されている状態は、高密度の H モードプラズマ状態として知られている。

一方、Balmer 線強度 I（α）は、主量子数 p = 3 の電子励起準位にある水素原子密度に比例する。

$$I(\alpha) = A(3,2)n_H(p=3) \tag{3-6}$$

励起水素原子密度は、主として基底準位の水素原子が電子衝突励起を経ることで生成され、自然放出過程による脱励起により消滅する。p = 3 → 2

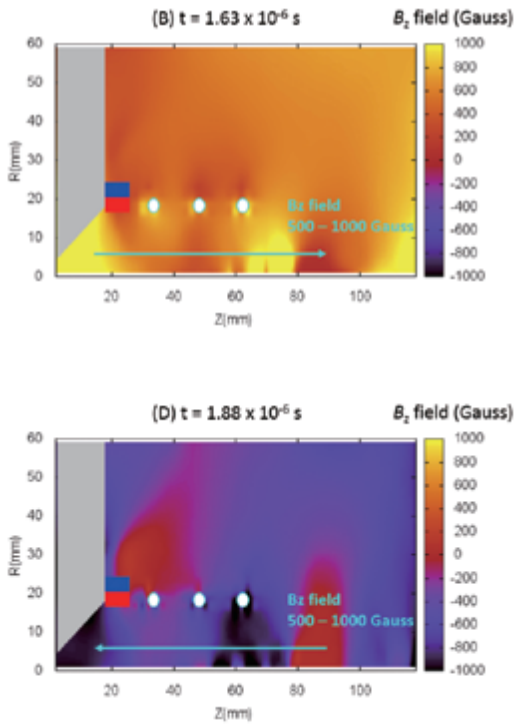


図 8　図 7 の RF 1 周期内（t = 1.63 × 10^{-6} s（上）, t = 1.88 × 10^{-6} s（下））の各時刻における軸方向磁場強度分布。

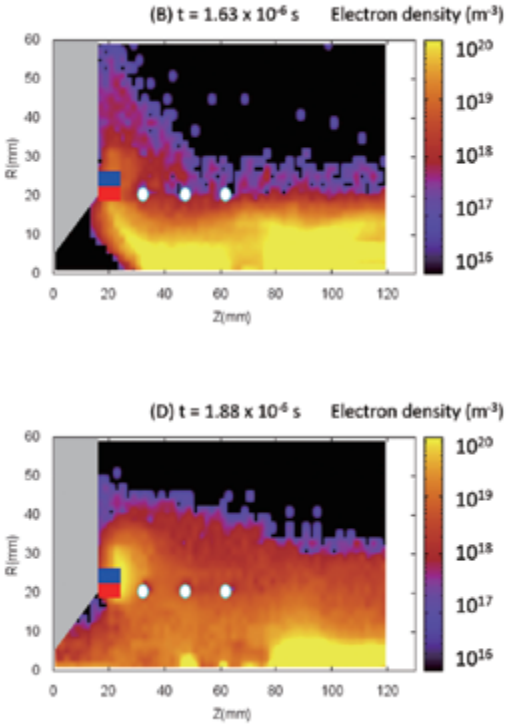


図９　図７の RF １周期内（t = 1.63 × 10^{-6} s（上）, t = 1.88 × 10^{-6} s（下））の各時刻における電子密度分布。

準位間の自然放出係数 A（3,2）は 4 × 10^{-7} s である一方、基底準位からの p = 3 への電子衝突励起断面積は σ = 10^{-21} m^2 程度であり、水素原子と電子の相対速度は v = 10^6 m/s オーダーである。電子密度が n_e = 10^{19} m^{-3} と考えると、水素原子から見た励起反応の時定数（$1/n_e\sigma v$）は 10^{-4} s と自然放出に比べて遅い。そのため、定性的には、電子衝突で励起された水素原子は、励起直後即座に Balmer 線を放出しながら脱励起すると考えられる。定常状態では、単位時間あたりの発光線強度は、p = 3 励起原子の生成量に比例することから、電子密度にも比例していると見做せる。

3.5. 分光計測とシミュレーションの比較

3.4 節の議論から、電子密度が 4 MHz で振動すると、RF プラズマから生じる Balmer α 線強度も 4 MHz で時間的に振動する。この結果は、3.3 節の J-PARC RF イオン源への PMT による発光分光計測結果と一貫している。

逆の言い方をすれば、一般的な RF イオン源に対しても、Balmer 線を計測したとき、発光強度の時間変化がイオン源に印加する RF 周波数の倍の周波数で振動していれば、誘導結合型の軸方向磁場と周方向電場が電子補足・加速に支配的に作用し、高密度 H モードプラズマが立ち上がっていると診断することが可能である。直接的なプラズマ温度・密度計測が困難な RF イオン源に対しては、この手法は極めて有効であると言える。

直接測定によるプラズマ状態の判断が可能であれば、イオン源下流に高電圧の静電加速部を準備してビーム引出しを行うことなく、プラズマが健全であることを確認することが可能である。

4. まとめ

第 17 回イオン源国際会議（ICIS）が CERN 主催でジュネーブにて開催された。ICIS はイオン源分野で世界最大の国際会議であり、今年は例年より多い 293 件の発表が行われた。

申請者にとって今年度の ICIS は、中国からの参加が例年より増え、かつ重粒子加速器用の ECR イオン源に関する発表件数が多い印象であった。また、H^- イオン源分野に関しても、H^- 輸送過程の計測手法の確立や、Cs 密度分布測定・解析に言及した発表が行われており、近年 1 – 2 年の大きな進展が感じられた。

申請者は、J-PARC RF イオン源の発光分光計測と数値シミュレーションとの比較を行った。光時間分解能の PMT による Balmer 線発光強度の測定から、RF 周波数の倍の周波数で時間的な線強度の振動が見られれば、プラズマが高密度の H モードにあることが診断可能である。

ICIS では、国内外、特に CERN, SNS の研究者から多くの有用なコメントを得た。J-PARC のようにビーム運転を長期間実施する施設で今後、さらなる長期間、高パワーのビーム運転を行う上で、イオン源の長寿命化と、連続運転中の監視体制の確立は重要性が高まってきており、定量的な議論に基づいた RF プラズマの制御手法を多く提案していく所存である。

■国際交流助成報告　3）

Joint US-CERN-Japan-Russia International Accelerator School 2017 報告

高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設
山本　尚人、道園　真一郎

1. はじめに

Joint US-CERN-Japan-Russia International Accelerator School 2017（http://www-conf.kek.jp/accschool17/index.html）は、“RF technology” をテーマに、平成 29 年 10 月 16 日より 26 日までの 11 日間にわたって、神奈川県三浦郡葉山町にある湘南国際村センター（写真 1）で開催されました。湘南国際村センターは 100 名程度を収容できる国際会議場と宿泊施設を兼ね備えています。館内には十分な速度と容量の無線 LAN も常設されており、参加者への講義ファイル配布やスクールの運営にとても役立ちました。このスクールは、米国、CERN、日本およびロシアの各加速器スクールが合同で開催するもので、参加者と講師、スクールのスタッフが文字通り寝食を共にし（写真 2）、加速器に関する知識を習得するのみに限らず、加速器の分野における世界的な交流を広めることを目的としています。今回のスクールは、2014 年のアメリカ・カリフォルニアで開催された加速器スクールに続くもので、高エネルギー加速器研究機構、総合研究大学院大学ならびに高エネルギー加速器科学研究奨励会から援助をいただきました。校長は KEK シニアフェローの肥後壽泰氏です。

今回のスクールには、大学・企業・研究所から約 55 名の受講者が出席し、講師陣 22 名による充実した講義を受けました（写真 3）。受講者の国籍とその人数を表 1 にまとめました。中国、ロシアからの受講者が多く、2 カ国で全体の 31％を占めています。受講者数は上記の 2 カ国にアメリカ、日本を加えると 50％を占め、残り 50％はアジア・ヨーロッパ等の各国からの参加者がバランス良く占めています。受講者は大学の修士課程にあたる学生から研究現場で実際に RF に携わる若手までで構成され、その年齢域は 20 代前半から 30 代後半までとなっていました。

表 2 にスクールの時間割を示します。10 月 24 日は Student Session に割り当てられ、希望者を募って参加者の研究内容などを紹介してもらいました。

写真 1　湘南国際村センター全景

写真 2　湘南国際村センターでの朝食

写真 3　授業風景

表１　受講者の国籍

国籍	人数	割合（%）
中国	9	16.4
ロシア	8	14.5
日本	5	9.1
アメリカ	5	9.1
韓国	3	55
インド	3	5.5
フランス	3	5.5
トルコ	2	3.6
タイ	2	3.6
ポーランド	2	3.6
インドネシア	2	3.6
スイス	1	1.8
フィリピン	1	1.8
パキスタン	1	1.8
メキシコ	1	1.8
マレーシア	1	1.8
イタリア	1	1.8
ギリシャ	1	1.8
ドイツ	1	1.8
カナダ	1	1.8
オーストリア	1	1.8

2. 講義の概要

表 2 に示した時間割のとおり、講義は 8 日間ありました。講義は RF 関連の基礎的・応用的内容を取り扱う講義が 21 コマ各 1 時間 30 分、また最新のホットなトピックに焦点を当てた講義が 5 コマ各 1 時間設けられました。また、施設見学日を除く日の昼食後に講義内容について講師に直接質問できる「Q ＆ A セッション」が各 1 時間ずつ設けられ、参加者は講義中に生じた疑問などを講師に直接問いかける機会を得ました（写真 4）。参加者の中にはこの時間を利用して実際の研究で直面している問題点について講師に相談する者も見受けられました。このような機会は参加者のみならず講師においても有益であったと思われます。

写真４　Q&A セッション時の様子

講義は基本的な内容から最先端の内容までバラエティに富んでおり、講義によってはその場で理解するのは困難な内容も存在しましたが、熱意のある参加者が今後より専門的な知識を深めていくための良い導入になったのではないかと期待します。また第一線で活躍されている講師陣が、各々豊富な研究経験をもとに特色ある講義をされたため、参加者は非常に興味深く受講したのではないかと思います。

講義は加速器全体の概要説明に始まり、続いて RF の基礎、常伝導及び超伝導加速管、電子・陽子・イオン加速管、RF コンポーネント及び放電現象、低電力 RF 装置及び大電力源、荷電ビーム・RF 計測など、RF に関連するトピックを網羅しています。講義資料はどなたでもウェブサイトからダウンロードできるので、興味のある方は是非ご覧になって下さい。

3. Social Events

10 月 20 日の金曜日は、鎌倉市への遠足を行いました。遠足前日までは雨の降り続く天気が続いていましたが、遠足の間はほとんど雨に降られることなく、スクール参加者および関係者の日頃の行いの良さを実感しました。遠足ではバス 2 台に分乗し、鎌倉大仏殿高徳院、長谷寺、鶴岡八幡宮を訪れました。遠足には語学ボランティアのグループで構成される KSGG（神奈川善意通訳者の

会）から計 4 人のガイドが同行して下さり、鎌倉及び各観光地について丁寧に説明して頂けました（写真 5）。また、同行中は全体のスケジュール管理にも気を遣って頂き、ほぼ予定通りの行程をこなすことができました。遠足に参加した受講者・講師はガイドの丁寧な説明を受けながら、落ち着いた佇まいの長谷寺とその内部に安置された美しい十一面観音菩薩、高徳院に鎮座する巨大な大仏、鮮やかな朱色の鶴岡八幡宮とそれぞれ趣の異なる 3 つの名所を堪能しました。さらに、遠足の最後には小町通りでお土産を物色する余裕もあり、わずか数時間の遠足ながら充実した内容となりました。

期間中、遠足の日以外はほぼ毎日雨が降り続く湘南国際村センターでしたが、台風 2 号の通過した 10 月 23 日は雨も上がり青空の広がる素晴らしい一日となりました。この日の午後は講義もなく翌日の Student Session の準備時間として割り当てられていたため余裕のある参加者はこの機を逃さず横浜や東京に繰り出していたようでした。また、スクール会場に残った熱心な参加者も夕焼けに輝く素晴らしい富士山を堪能することができ、ほぼ缶詰状態で酷使された心身をリラックスすることができました（写真 6）。

湘南国際村センターでの講義の最終日にはビュッフェ形式の Special Dinner が用意されました（写真 7）。Special Dinner では、8 日間に渡った講義を友に過ごした受講者と講師陣が夜遅くまで楽しい時間を過ごすことができました。

写真 5　長谷寺でガイドの説明を聞く参加者

写真 6 台風一過の日の夕方（湘南国際村センターからの富士山）

写真 7　講義最終日の Special Dinner

4. 施設見学

一連の講義終了後の 10 月 25 日と 26 日には、加速器施設の見学を行いました。見学では 10 月 25 日に J-PARC を、翌 26 日には KEK つくばキャンパスを訪れました。湘南国際村センターから茨城県東海村にある J-PARC への移動では、首都高速道路の渋滞により予定が一時間以上遅れましたが、KEK J-PARC 広報セクションの方々及び関係者らの配慮により予定された見学箇所を全てまわることができました。

KEK つくばキャンパス見学では、入射器棟、KEKB トンネル、Belle 検出器を訪問・見学しました。朝 9 時過ぎから 12 時前までこれら 3 カ所をじっくりと回ることができ、参加者も満足できたのではないかと思います。見学後には KEK つくばキャンパス構内で昼食をとった後、参加者をつくばセンターまでバスで送り出し、スクールは

無事終了となりました。最後に湘南国際村センターで撮影した参加者の集合写真を示します。(写真 8)。写真には写りませんでしたが、肉眼では奥にうっすらと富士山がたたずんでいました。

写真８　湘南国際村センターでの集合写真

5. おわりに

高エネルギー加速器科学研究奨励会からはアジアからの参加者４名の航空運賃を助成いただきました。加速器および高周波源を学ぶ貴重な機会となったと思います。感謝いたします。

表２　スクールのプログラム

Draft program for Joint US-CERN-Japan-Russia International Accelerator School 2017 -RF Technologies-

Oct. 16-26, Hayama, Japan

October	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Sun	Mon	Tue	Wed	Thu
8:40	Arrival Registration	Introduction	Basic concept	Cavity 1 NC electron linac	Beam diagonostics	Cavity 2 NC electron ring	Cavity 3 NC proto ion, RFQ	Cavity 4 SRF 1GHz<	Cavity 5 SRF low-beta	Going to KEK, Tokai	Vist at KEK, Tsukuba
10:10		K. Takayama	T. Higo	H. Ego	T. Obina	S. Sakanaka	O. Kamigaito	E. Kako	E. Kako		
		Coffee	Coffee	Coffee	Coffee	Coffee	Coffee	Coffee	Coffee		
10:30		RF theory	Klystron	RF measurements	Manufacturing Techniques	Electric discharge	LLRF 1	LLRF 2	Simulation to		
12:00		T. Higo	S. Fukuda	D. McGinnis	Y. Higashi	Y. Saito	F. Qiu	Z. Fang	Z. Li		
		Lunch	Lunch	Lunch	Lunch	Lunch	Lunch	Lunch	Lunch	Lunch	Lunch
13:30 14:30		Q&A	Q&A	Q&A	Open time	Q&A	Q&A	Q&A	Q&A	Vist at KEK, Tokai	Departure
		Coffee	Coffee	Coffee		Coffee	Coffee	Coffee	Coffee		
14:50		Basic concept	Klystron powe supply	Waveguide system		Window, Load	Deflecting cavity	Preparation o presentation	Oral presentation by students		
16:20		T. Higo	M. Akemoto	S. Kazakov		Y. Saito	R. Calaga				
		Coffee	Coffee	Coffee		Coffee	Coffee	Coffee	Coffee		
16:40		Euro-XFEL, ILC, LCLS II	LHC	Pulse compression		NC Linac	Medical Applications	Preparation o presentation	Oral presentation by students	Going to KEK, Tsukuba	
17:40		M. Ross	P. Lebrun	J. Wang		M. Boland	A. Degiovanni				
18:00	Buffet Dinner	Dinner	Dinner	Dinner	Dinner	Dinner	Dinner	Dinner	Special Dinner	Dinner	

■国際交流助成報告　4）

UTTAC における Lamb シフト型偏極イオン源の再構築と研究開発

筑波大学
研究基盤総合センター応用加速器部門
森口　哲朗

1. UTTAC について

Lamb シフト型偏極イオン源（Polarized ion source, 略して PIS）は、1970 年代中頃、筑波大学のタンデム加速器施設（University of Tsukuba Tandem Accelerator Complex, 略して UTTAC）に 12UD ペレトロンタンデム加速器（米国 NEC 社製）へのイオン源の一つとして建設された [1]。PIS は偏極陽子ビームや偏極重陽子ビームを生成することができ、主に、原子核実験の分野で利用されてきた。PIS を含む三種のイオン源は加速器棟の 9 階に設置され、ビームは 7 階から 3 階に縦型に設置されたタンデム加速器によって鉛直方向に加速され、1 階の各ビームコースへ輸送された。ところが、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災によって、UTTAC の加速器や実験装置は大きな被害を受けた [2]。図 1（a）は、震災によって、加速器タンク（約 20 m）の底に崩落したターミナルシェルや加速管を示している。また、図 1（b）は、震災によってベローズやアンカーボルトが破損し、PIS 下流の Wein Filter がビームラインから約 1 m 移動した様子を示している。このように、12UD ペレトロンタンデム加速器は使用不能となり、PIS も大きな被害を受けた。

2. 震災後の復興

震災後、UTTAC の復興計画が検討され、新規加速器の導入と PIS の再構築が決まった。図 2（a）は新規に導入された 6 MV タンデム加速器（18SDH-2、米国 NEC 社製）で、加速器棟の 1 階に設置されている [3]。図 2（b）は、再構築後の PIS である [4]。現在の PIS は、加速器棟の西側に新たに建設された PIS 棟に設置されている。

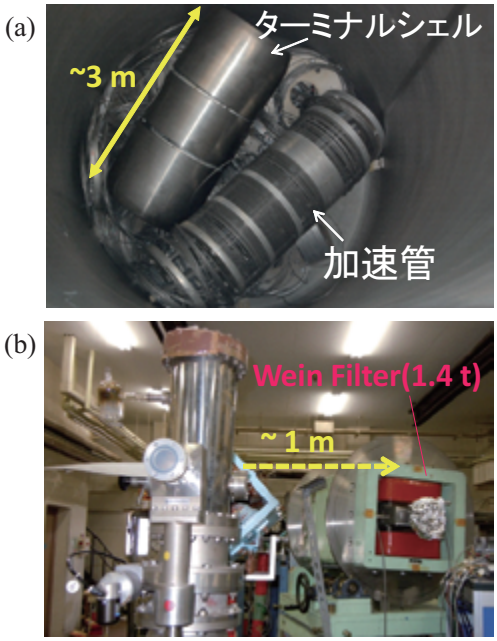


図 1　震災による UTTAC の被害状況の一部。（a）加速器タンクの底に崩落したターミナルシェルや加速管。（b）ビームラインから移動した PIS 下流の Wein Filter。

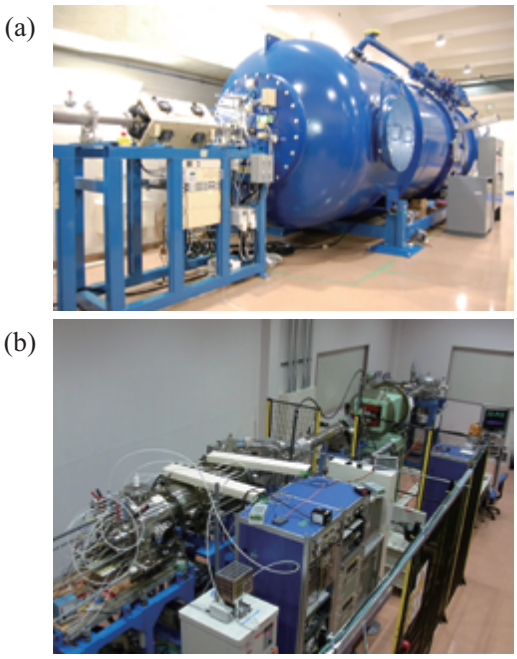


図 2　復興後の（a）新加速器と（b）再構築した PIS。

Duoplasmatron や Wein Filter 等の PIS のメインコンポーネントは再利用が可能だったため、加速器棟の 9 階から 1 階まで移動させた。それ以外の震災によって破損した物品は、新しいものに交換した。2015 年 3 月末までには、再構築をほぼ完了させ、その後は、制御システムなどの整備を進めた。

3. 偏極ビームの偏極度測定

新規の 6MV タンデム加速器は、2016 年 3 月より本格的に稼働した。それに伴い、PIS からの偏極ビームの確認や偏極度測定を行った。

Lamb シフト型偏極イオン源で重要なコンポーネントの一つが Spin Filter（SF）と呼ばれるソレノイドコイル中の RF キャビティである。SF では、ビーム軸方向に静磁場と振動電場、ビーム軸と垂直方向に静電場を印可することができる。これらを適切に設定すると、特定の核スピン状態を生成することができ、偏極ビームとして引き出すことができる。図 3 は、SF の静磁場を変化させた時に PIS 下流のファラデーカップで測定したビーム電流値を示す [5]。陽子ビームの場合、540 G と 605 G 付近に見られる共鳴ピークは、それぞれ、核スピンが +1/2 と -1/2 の状態に対応する。また、重陽子ビームの場合でも、565 G、575 G、585 G 付近に見られる共鳴ピークは、それぞれ、核スピンが +1、0、-1 の状態に対応する。この結果から、再構築後の PIS による偏極ビームの生成を確認することができた。偏極度を見積もるために、クエンチング法と呼ばれる手法を用いると、核スピン +1/2 の偏極陽子ビームの偏極度は約 80% だった。これは、震災前の値とほぼ同等と言える。また、偏極陽子ビームを 12 MeV まで加速させ、陽子と He との弾性散乱に基づくポラリメータを利用し、ビームコース末端における偏極度を測定した。本測定で得られた偏極度は約 40% であり、PIS からビームコース末端までのビーム輸送中に減偏極があることがわかった。この原因については、現在、調査中である。

4. 不安定核の核モーメント測定

PIS からの偏極ビームを利用した原子核実験として、不安定核の核モーメント測定を試みている。磁気双極子モーメントや電気四重極モーメントは原子核の基本的な物理量の一つである一方で、不安定核に関するこれらの実験的情報は乏しいのが現状である。現在、実験システムの構築を目的として、偏極陽子ビームを Si 等のストッパーに照射させ、^{25}Al や ^{29}P 等の不安定核の生成と核偏極移行の確認を進めている。

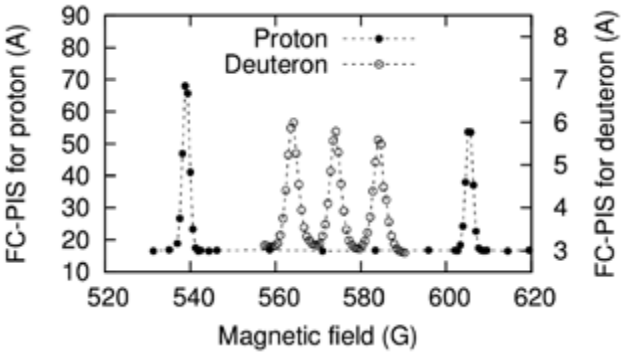


図 3　SF の磁場を変化させた時の PIS 下流のファラデーカップで測定した陽子ビーム（●）と重陽子ビーム（○）のビーム電流値。実際には一価の負イオンとして引き出されるため、電流値は負として測定される。

5. PSTP2017

2017 年 10 月 16 日～ 21 日に、“The 2017 International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry（PSTP2017）” が韓国のテジョン市で開催された。PSTP は偏極をテーマとした国際ワークショップであり、2 年おきに開催され今年で 17 回目となる。本ワークショップは Korea Advanced Institute of Science and Technology（KAIST） の Munji キャパスが会場となった（図 4）。テジョン市には KAIST の他に多くの研究所が集中しており、科学都市としても知られる。また、テジョン市は 1993 年に国際博覧会が開催され、その跡地は、現在、エキスポ科学公園になっている。

PSTP2017 では、約 50 名が参加した。発表は、Electron Polarimetry や Polarized solid targets 等のセッションに分かれて行われた。著者は PSTP2017 に参加し、Polarized ion sources というセッションにおいて “Lamb-shift Polarized Ion Source at UTTAC” というタイトルで口頭発表を行った。質疑応答では、上記のクエンチング法に関することや震災後の復興に関する質問を受けた。ワークショップの名称の通り、偏極イオン源、偏極標的、ポラリメータに関する発表が主であったが、特に、偏極標的に関する発表が多く、この分野のアクティビティの高さを実感した。個人的

(a)

(b)

図 4　(a) 会場となった KAIST（Munji キャンパス）、(b) 会場の入口。

には、Lamb シフトを利用したポラリメータや偏極核融合反応に関する話題に興味を持った。休憩時間中、本ワークショップの参加者と Lamb シフト型偏極イオン源に関する議論を行い、また、重要な参考文献も入手することができた。

会期中、KAIST の Munji キャンパス内にある Center for Axion and Precision Physics Research（CAPP）の施設見学を行った（図 5）。CAPP ではダークマターの有力候補とされているアクシオンの探索実験が計画されており、そのための実験装置の開発が進められている。

このように、PSTP2017 で過ごした有意義な時間を今後の研究活動に活かしたいと考えている。

図 5　Center for Axion and Precision Physics Research（CAPP）の施設見学の様子。

参考文献

[1] Y. Tagishi et al., Nuclear Instruments and Methods 164, 411 (1979).

[2] K. Sasa et al., UTTAC, ANNUAL REPORT 2010, 4 (2011).

[3] K. Sasa et al., Proceedings of HIAT2015, 285 (2015).

[4] T. Moriguchi et al., UTTAC, ANNUAL REPORT 2014, 6 (2015).

[5] T. Moriguchi et al., UTTAC, ANNUAL REPORT 2016, 4 (2017).

アジア加速器用超伝導・低温技術スクール

高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設
仲井　浩孝

1. スクールの概要

アジア加速器用超伝導・低温技術スクール（Asian School on Superconductivity and Cryogenics for Accelerators; ASSCA）は、1999 年に中華人民共和国懐柔および北京で行われたアジア加速器スクール（Asian Accelerator School; AAS）を受け継ぐものとして、2017 年 12 月 10 日から 17 日までの 8 日間に亘り、高エネルギー加速器研究機構（KEK）で開催された。主催は高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設およびアジア地域将来加速器委員会（Asian Committee for Future Accelerators; ACFA）である。

今回のスクールでは、今後、アジア地域でも超伝導加速器の計画・建設・運転が増大する見通しから、次の世代を担うアジア地域の若手研究者に超伝導および低温技術の知識と経験を与えることを目的としている。AAS の精神を受け継ぎ、講義だけではなく、実際の経験によって超伝導および低温技術を学べるように、1 日の前半を講義、後半を実習とした（Fig. 1 参照）。また、実習をより効果的なものにするため、参加者の人数を 40 名に限定した。さらに、アジア地域の若い研究者や大学院生が参加しやすいように、参加登録料、宿泊費、および通常の食費は無料とした。ただし、KEK までの渡航費・交通費は各受講者の所属機関の負担とし、また、優秀で向学心のある受講者を選ぶために、各受講者の履歴書だけではなく、上司あるいは指導教員の推薦書の提出を求め、受講者の選抜を行った。

School Time Table (as of Nov. 13, 2017)

Time	Dec. 10, 2017 Sunday	Dec. 11, 2017 Monday	Dec. 12, 2017 Tuesday	Dec. 13, 2017 Wednesday	Dec. 14, 2017 Thursday	Dec. 15, 2017 Friday	Dec. 16, 2017 Saturday	Dec. 17, 2017 Sunday	Dec. 18, 2017 Monday
- 8:30	Arrival Day	Breakfast							
8:30 - 8:40 (10 min.)		Welcome	Information / Announcement					Excursion	Departure Day
8:40 - 10:10 (90 min.)		Introduction 1 (SC & Cryogenics)	SC Magnet (Theory 1)	SC Magnet (Eng. 2)	SC Cavity (Theory 2)	Special Talk 2 (SC Cavity)	Cryogenics (Eng. 1)		
10:10 - 10:30 (20 min.)		Group Photo	Coffee Break						
10:30 - 12:00 (90 min.)		Introduction 2 (Accelerator 1)	SC Magnet (Theory 2)	Special Talk 1 (SC Magnet)	SC Cavity (Eng. 1)	Cryogenics (Theory 1)	Cryogenics (Eng. 2)		
12:00 - 13:10 (70 min.)		Lunch							
13:10 - 14:40 (90 min.)		Introduction 3 (Accelerator 2)	SC Magnet (Eng. 1)	SC Cavity (Theory 1)	SC Cavity (Eng. 2)	Cryogenics (Theory 2)	Special Talk 3 (SC & Cryogenics)		
14:40 -15:00 (20 min.)		Coffee Break							
15:00 - 16:00 (60 min.)		Training A Introduction	Training A	Training B Introduction	Training B	Training C Introduction	Training C		
16:00 - 18:30 (150 min.)		Training A		Training B		Training C			
18:30 -		Welcome Party	Dinner				Banquet	Dinner	

Fig. 1　スクールの時間割

2. 受講者

2.1. 募集方法

受講者の募集に当たり、Fig. 2 に示すスクールのポスターを作成した。ACFA の委員や加速器関係者へこのポスターと共にスクール概要を送付し、受講者募集の協力を依頼した。また、スクールのウェブサイトを立上げ、インターネットでも検索できるようにした。その結果、申込み締切りまでに、アジア地域内外から約 65 名の応募があった。

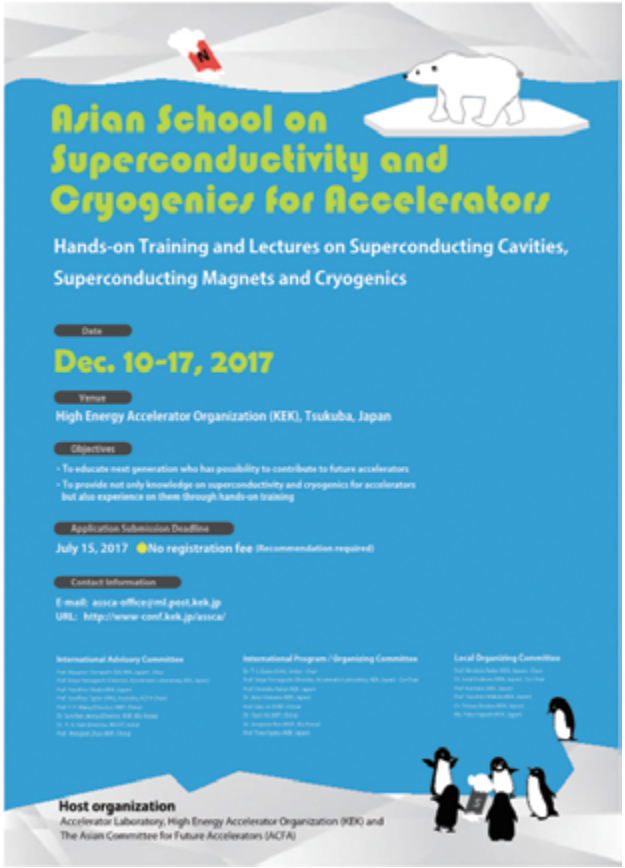


Fig. 2　スクールのポスター

2.2. 受講者の選抜

受講申込みが定員の 40 名を超えたため、受講者の選抜を行なった。まず、受講申込みの条件である履歴書と推薦状の提出がない申込みを排除した。この条件を満足した申込者の推薦者に、渡航費・交通費の負担を承認済みであるか確認し、最終的な受講者を決定した。

2.3. 参加者の国籍および職業

受講者および講師（参加者）の国籍を Table 1 に示す。国籍は、日本を含む 9 か国となっている。インドと中国からの受講者が多く、講師は日本人が主となっている。日本では超伝導や低温技術に関する種々のスクールが日本国内で既に行われているため、日本からの受講者が少なかったと考えられる。唯一の日本人受講者は総研大の学生である。

Table 1　参加者の国籍と参加者数

国名	受講者数	講師数
インド	10	2
オーストラリア	1	0
韓国	4	0
タイ	4	0
台湾	5	0
中国	15	1
日本	1	12
パキスタン	1	0
ロシア連邦	1	0
計	42	15

Table 2 に受講者の職業を示す。研究者や大学等の教員が全体の 1/3 強を占め、技術者が 1/3 弱、ポスドクや大学生、大学院生が約 1/3 となっている。

Table 2　受講者の職業

職種	受講者数	割合 [%]
研究者・教員	15	36
技術者	13	31
ポスドク	13	7
大学生・院生	11	26
計	42	100

3. 講義および実習

講義と実習は、それぞれ

・超伝導空洞
・超伝導磁石
・低温技術

の 3 つの分野について、講師や内容を設定した。

3.1. 講義

講義は、各分野の理論的な側面、技術的な側面のそれぞれから鳥瞰するような講義を中心に、各分野の最新の話題を提供する講義も提供した。また、各分野の講義に先立って、超伝導や低温技術、加速器の概論を紹介する講義を行なった（Fig. 1 参照）。概論が 2 つ、超伝導磁石関係の講義が 6 つ、超伝導空洞関係の講義が 6 つ、低温技術関係の講義が 4 つの合計 18 の講義を行った。

Fig. 3　講義風景

3.2. 実習

実習は 2 日間で 1 分野の実習を行い、6 日間で 3 つの分野全ての実習を行えるように時間割を設定した。受講者を 3 つのグループに分け、各グループは 2 日毎に異なる分野の実習を行った。各分野の実習初日には、実習内容の原理や方法などの説明を行い、その後、2 日間の実習を行った。

3.2.1. 超伝導空洞

・ニオブの残留抵抗比（RRR）の測定
・銅製空洞とニオブ製空洞の室温での共振周波数測定
・銅製空洞とニオブ製空洞の室温での Q 値の測定

Fig. 4　ニオブ製空洞の Q 値測定

3.2.2. 超伝導磁石

・超伝導磁石関連施設の見学
・高温超伝導体の磁気浮上おもちゃの製作

Fig. 5　磁気浮上おもちゃの製作

3.2.3. 低温技術

・科学おもちゃ
　1. 液体窒素による酸素の液化
　2. 高温超伝導コースター
　3. 異なる温度での種々の金属の渦電流
・超流動ヘリウムの生成
・低温での温度測定

Fig. 6　超流動ヘリウムの生成

4. 行事

スクールでは、講義と実習の他に、バンケットと遠足を催した。両方の催し物への参加は任意とし、参加する人と参加しない人との不公平感をなくすため、バンケットと遠足それぞれの参加費を徴収した。

4.1. バンケット

バンケットを講義・実習の最終日である 12 月 16 日（土）の夕方に催した。会場はつくば中心部の宴会場を使用し、和食ビュッフェの立食とした。KEK からの移動は宴会場のマイクロバス 2 台を利用した。

Fig. 7　バンケット会場で

4.2. 遠足

スクール最終日の 12 月 17 日（日）に、東京スカイツリーの下にある「すみだ水族館」と浅草への遠足を行なった。KEK- 東京間の移動はバスをチャーターした。KEK を出発して、KEK に戻ってくるまでのスケジュールは決めたが、帰国する航空機のスケジュールが参加者によって異なるため、KEK 出発後は原則自由行動・解散とした。

水族館はありふれた施設であるが、国外からの参加者のみならず、日本人にも意外と好評であった。浅草寺は、ちょうど年末の羽子板市が行われており、かなり混雑していた。

Fig. 8　浅草・浅草寺雷門前で

5. まとめ

アジア加速器用超伝導・低温技術スクールは無事成功裏に終了した。スクールには、KEK の職員および総合研究大学院大学の学生を含め、アジア地域を中心に日本を含む 9 か国から受講者 42 名と講師 15 名が参加した。平成 29 年 12 月 10 日（日）から 12 月 17 日（日）までのスクール期間中、18 の講義と 3 種類の実習を行った。受講生へのアンケートの結果では、講義、実習共に時間の長さや難易度については概ね適切であったとの評価を得た。また、食事や宿舎についても好評であった。

Fig. 9　スクールの集合写真

謝辞

アジア加速器用超伝導・低温技術スクールを運営するに当たり、スクール参加者の宿泊費助成をしていただいた公益財団法人高エネルギー加速器科学研究奨励会に御礼申し上げる。また、スクールの実施に関しては、高エネルギー加速器研究機構管理局および加速器研究施設、素粒子原子核研究所、超伝導低温工学センターの皆様に多大なご協力をいただいた。各位に感謝する。

レクチャー＆コンサート「科学と音楽の饗宴 2017」開催報告

1. 開催日時
　平成 29 年 11 月 19 日（日）14 時～

2. 会場
　ノバホール（つくば市吾妻 1-10-1）

3. プログラム
　【第 1 部　講演】「進化論から進化学へ：進化する進化論」
　　講師：長谷川　眞理子（総合研究大学院大学長）

　【第 2 部　コンサート】「科学と共に進化する音楽」
　　ピアノ：山岸　ルツ子
　　～曲名～
　　F. リスト作曲
　　「エステ荘の噴水（巡礼の年第 3 年 IV）」
　　「ラ・カンパネラ（パガニーニ大練習曲より）」
　　C. ドビュッシー作曲
　　「月の光」
　　「喜びの歌」
　　I. ストラヴィンスキー作曲
　　「ペトルーシュカからの 3 楽章」

4. 来場者数
　744　名

5.「科学と音楽の響宴 2017」開催報告

科学に関する講義と音楽コンサートを融合したレクチャー＆コンサート「科学と音楽の響宴 2017」を 11 月 19 日（日）、茨城県つくば市のノバホールで開催しました。

このイベントは、2005 年に世界物理年を記念して、物理学の講演と、現代物理学の父・アインシュタインが愛したヴァイオリンの演奏を組合せて開催したことに始まり、今回で 11 回目を迎えました。KEK、つくば市、つくば文化振興財団が共催し、高エネルギー加速器科学研究奨励会が協賛しています。

第 1 部は、今年 4 月に総合研究大学院大学の学長に就任した長谷川眞理子さんによる「進化論から進化学へ：進化する進化論」と題した講演が行われました。長谷川さんは、「カブ、ハクサイ、ミズナ、ダイコンのうち仲間外れは誰でしょう？」などとクイズを出しながら、種についてや進化学の変遷について分かりやすく解説。2004 年にはヒトゲノムがすべて解読されたことを紹介した上で、遺伝子を読み解く技術の改良や新たな化石の発見などで、「進化論はこれからさらに発展するでしょう」と今後の展望を話していました。

第 2 部では、ピアニストの山岸ルツ子さんが「科学と共に進化する音楽」と題してトークコンサートを行い、人の手の届く限界を超えた音程の跳躍などの超絶技巧で知られる F. リストの「ラ・カンパネラ（パガニーニ大練習曲より）」など、アンコール曲を含めて 6 曲演奏しました。山岸さんは、天文学者として知られるピタゴラスが今の音階の原型を作ったことなど、科学と音楽の密接な関係を紹介しながらコンサートを進行。笑いを交えた山岸さんのトークと幻想的なピアノの音に、来場者は感嘆の溜息を漏らしながら聴き入っていました。

進化論について分かりやすく講義する長谷川眞理子さん

リストの「ラ・カンパネラ」など６曲を演奏した山岸ルツ子さん

公益財団法人　高エネルギー加速器科学研究奨励会
奨励賞（西川賞・小柴賞・諏訪賞・熊谷賞）受賞者について
（平成 29 年度）

平成 29 年度の公益財団法人　高エネルギー加速器科学研究奨励会　奨励賞（西川賞・小柴賞・諏訪賞・熊谷賞）は、平成 29 年 11 月 24 日に開催された選考委員会及び平成 29 年 12 月 18 日に開催された理事会において審議の結果、受賞者は次の通り決定いたしました。

なお、受賞者に対する奨励賞（西川賞・小柴賞・諏訪賞・熊谷賞）授与式は、平成 30 年 2 月 13 日（火）14 時 30 分より、アルカディア市ケ谷（私学会館）において開催されました。

1. 小柴賞 NO.1

1）受賞者氏名　初井（はつい）　宇記（たかき）（45 歳）

2）所属機関　理化学研究所　放射光科学総合研究センター XFEL 研究開発部門

3）研究テーマ　「SOI 技術を用いた広ダイナミック・レンジ X 線イメージセンサーの開発」

4）受賞理由　本研究では、最先端技術である Silicon-On-Insulator（SOI）技術を用い、従来の X 線検出器よりもはるかに広いダイナミック・レンジを持つ新しい X 線イメージセンサーの開発に成功した。

開発した X 線イメージセンサーは、SOI 技術により、センサーと読み出し回路が一体化されており、さらに 64.8 × 26.7mm^2 という大きな有感面積をもっている。

また、広いダイナミック・レンジを実現するために、一つのピクセル内に多数のセンスノードを設けることで信号を分離し異なるゲインを実現するという世界で初めての手法を開発している。

本センサーは超高輝度 XFEL 加速器（SACLA）での実験用に開発され、カメラシステムとしても完成している。

現在は、XFEL、Spring-8、KEK-PF の複数の実験でカメラシステムの使用が開始されている優れた実績を持つ。

以上のように、本研究で開発に成功した新しい X 線イメージセンサーは過去に例のない、優れた性能を有している。

よって、本研究は小柴賞授賞にふさわしい内容である。

小柴賞 No.1　授賞式・成果発表の様子

2. 小柴賞 NO.2

1）受賞者氏名　小嶋（こじま）　健児（けんじ）（49 歳）

2）所属機関　高エネルギー加速器研究機構　物質構造科学研究所

3）研究テーマ　「高集積陽電子検出器システム Kalliope の開発と実用化」

4）受賞理由　本研究は、大強度 Muon ビーム実験のための超高計数率崩壊陽電子計測システム「Kalliope」を開発である。

プラスチックシンチレータと PPD、独自開発の ASIC と FPGA による高密度信号処理ボードをコンパクトな一体型モジュールに収めることで、従来にない多チャンネル化と高計数率を実現した。

これにより、J-PARC　MLF の世界最強度パルス Muon による物理測定が可能となった意義は極めて大きい。

小嶋氏はこの開発研究において中心的な役割をになっていた。

システムは優れた拡張性と汎用性を有しており、今後 J-PARC　MLF 以外の Muon 測定にも活用されることが決まっており、特定の実験にとどまらないこの分野の計測のスタンダードになりつつあるという点も見逃せない。

以上のように、本研究開発は小柴賞授賞にふさわしい内容であると考えられる。

小柴賞 No.2　授賞式・成果発表の様子

3. 諏訪賞

1）受賞者氏名　新井（あらい）　康夫（やすお）（62 歳）

所属機関　高エネルギー加速器研究機構　素粒子原子核研究所

倉知（くらち）　郁生（いくお）（58 歳）

所属機関　高エネルギー加速器研究機構　先端加速器推進部

2）研究テーマ　「SOI 技術を使った革新的ピクセルセンサーの実現」

3）受賞理由

新井、倉知両氏は、先端的な半導体技術である SOI（Silicon-On-Insulator）技術を導入することによりシリコンピクセルセンサーに革新をもたらし、これまでにない高精細、高機能、高検出効率を持ったピクセルセンサーの実現に成功した。

従来、半導体技術を用いたシリコンピクセルセンサーは、CCD 検出器、CMOS ピクセルセンサー、ハイブリッドピクセル型などが開発されてきたが、放射線検出器としてみた場合には、繰り返しが遅かったり、空乏層が薄く検出効率がほとんど稼げない、ピクセルサイズの制限により高精細が実現できないなど、高性能センサーとしては満足のいくものとは言えなかった。

新井氏は、これらの課題を解決するために、シリコン基板上に薄いシリコン酸化膜を介て CMOS 回路層となる別の薄いシリコン層を貼り付けるという SOI ウェファーを用いた CMOS 集積回路技術に着目した。

これを利用することにより、SOI ウェファーにおいて高抵抗のシリコン結晶を使うことで放射線に対して高い検出効率を持たせ、同時にその信号電荷を酸化膜を貫通した電極を通じて上層の CMOS 回路層へ伝送して高機能な信号処理を行うことを可能とした。

このことにより、センサーと信号処理回路全体が一連の半導体プロセスだけで一体のチップ（monolithic chip）として製造することも可能となった。

新井氏と倉知氏は、このアイディアを基に、半導体製造のパートナーとして共同開発研究を開始し、10 余年をかけて開発を進めたが、実用的な段階に達するには多くの技術革新を必要とした。

二人は新しいアイディア・議論と試験測定を繰り返し、これを乗り越えることに成功した。

この開発により実用への道が開け、SOPIX コラボレーションという一種のコンソーシアムを立ち上げ､国内外の潜在的なユーザーを掘り起こすことにも着手した。これにより、1 つのウェファー上に複数のユーザーが相乗りしてユーザーチップを試作しながら開発が進められるようになり、開発コストを軽減し技術の普及が大きく進むこととなった。

現在までに、既に、1）世界最大級の x 線用 monolithic chip（SOFIAS チップ）、2）空乏層厚 500 μm の monolithic pixel sensor（INTPIX チップ）、3）荷電粒子トラッキングで世界最高精度（0.7 μm）（FPIX チップ）などの世界最高性能の検出器が開発されてきている。

基本的なアイディアから実用化までを我が国で貫徹されたという意味でも特筆すべきことであり、本開発研究は日本の技術が誇る偉業であり、諏訪賞の授賞にふさわしいと考える。

諏訪賞　授賞式・成果発表の様子

4. 熊谷賞

1）受賞者氏名　　矢ヶ崎（やがざき）　文昭（ふみあき）（53 歳）

2）所属機関　　株式会社　電研精機研究所

3）研究テーマ　　「ノイズカットトランスの発明、及び各種安定化電源の開発等、多年に亘る加速器科学への貢献」

4）受賞理由　　電研精機研究所が開発・製造した，各種実験用設備のノイズ障害防止を目的とした障害波遮断変圧器（商品名：ノイズカットトランス）ならびに各種安定化電源は、国内の多くの加速器施設において、加速器の開発・運転ならびに研究開発に使われてきており、加速器の性能向上と安定運転に大きく貢献してきた。

この業績は、電研精機研究所の創業者である故矢ヶ崎昭彦氏とご子息である現社長の矢ヶ崎文昭氏の長年にわたる絶え間ない努力によるものであり、熊谷賞の授賞に値すると判断した。

熊谷賞　授賞式・成果発表の様子

賞授与式　集合写真

SOI 技術を用いた広ダイナミック・レンジ（高ピーク信号）X 線イメージセンサの開発

理化学研究所
放射光科学研究センター
初井　宇記

1. 背景

X 線と物質の相互作用のうち、放射光分野で重要なものに光電効果による X 線吸収、吸収後に引き続いて起こる蛍光 X 線放出、弾性散乱、コンプトン散乱がある。これらのうち、X 線吸収は試料の厚みが厚くなると、弾性散乱は散乱角がおおきくなると急激に強度が弱くなる。この強度差が極めて大きな吸収、散乱パターンの測定が多くの線実験で重要となっている（Fig. 1）。このため X 線が発見されてから今日に至るまで、如何にして強い X 線と弱い X 線を同時に測定するか、ということが実験技術として極めて重要なテーマであった。2000 年代のトピックの一つが、この要請に対応した広いダイナミック・レンジ（高ピーク信号 [1]）を有する光子計数型検出器が開発され、放射光分野で多くの成果を上げた [2]。

近年では X 線自由電子レーザー（XFEL）により極めて強い X 線をフェムト秒スケールで発生させることができるようになり、日本では理化学研究所が SACLA を建設し 2012 年から共用を行っている。XFEL では、フェムト秒という短い時間内に多数の光子が同時に到来する。X 線検出では量子効率を向上させるため厚膜（～ 300 μm）のフォトダイオードを利用することが多いが、厚み方向に信号電荷が移動するだけでも 1-10 ナノ秒程度時間がかかるので、X 線を数える計数方式は適用不可能となる。したがって信号電荷の合計を計測する積分型画像検出器の開発が世界的に活発に行われている [2]。

筆者らのチームは、2007 年から SACLA 施設の高性能画像検出器として Multi-portCCD [3] を開発してきた。Multi-port CCD は、米国の LCLS で用いられているハイブリッド検出器 CSPAD [5] に比べて広ダイナミック・レンジ、低いノイズ、小さな画素等、多くの飛躍的な性能向上をもたらした。SACLA では現時点で 29 の検出器システムが整備をおこない共用課題の約 7 割で利用されている [5]。最近では、韓国の XFEL 施設 PAL-XFEL でも活用され始めている [6]。

2. 電荷分割方式と SOI 技術

2007 年頃の議論では、1 画素あたり 1 万光子程度のピーク信号を実現することが XFEL 分野における暫定的なターゲットとして認識されていた。シリコンセンサを用いた場合、X線光子エネルギ

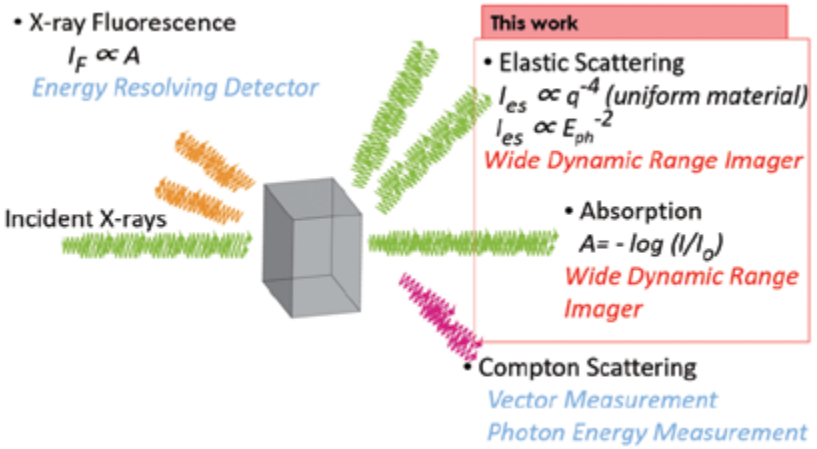


Fig. 1　X 線と物質の相互作用と本研究の対象

ー 6 keV で 16.4 Me- に相当する。我々は、画素あたり 1 万光子、あるいはそれ以上のピーク信号を小さな画素で実現することは CCD 技術の延長には不可能と考え、新しい技術を 2007 年から並行して検討してきた。我々が注目したのは 1 光子当たりの電荷量である。6 keV 光子の場合、1.6 ke- の信号電荷が発生する。微弱信号領域で 1 光子を確実に検出する観点では 1 光子当たりの電荷が大きく有利であるが、1 万光子検出時には信号電荷は多すぎる。したがって、1 光子それぞれから発生する電荷を一定の割合で削減することが望ましい。そこで、電荷を常に一定の割合で分割できる画素構造を実現できないかと考えた。シリコン中で信号電荷が深さ方向に移動する際に、熱拡散によってセンサ面内に 10 μm 以上に広がる。この広がりは、複数の画素に信号電荷が分割されてしまうので空間分解能が劣化する（charge sharing）。しかしながら電荷分割という観点からみると、信号電荷の広がりよりも十分小さな電荷収集微細構造を構築すれば電荷分割できることを意味しており、大変興味深い。そこで 2007 年 12 月、Silicon-on-insulator 技術を活用した放射線検出器 SOIPIX の開発を進めておられた高エネ研新井教授に共同研究者の工藤統吾とともに訪問し、その可能性について議論を行った。その結果半導体微細加工技術をインテグレーションした SOIPIX では実現できる可能性があるとの結論に至った。そこでその後 SOIPIX コラボレーションに加わり、SOIPIX の基盤技術のうち特に放射光等の X 線用途で必要となる、つなぎ合わせ露光による大面積センサ製造方法、厚い空乏層を実現するための floating zone ウェハの導入と歩留まり改善、トランジスタの放射線損傷解析に取り組んできた。

3. SOPHIAS

最終的に採用した SOPHIAS 検出器の画素構造について Fig. 2a に示す。信号電荷のドリフトの様子を Fig. 2b にに示している [7]。センサ裏面から入射した X 線光子は光電変換され信号電荷を生成する。信号電荷は電界によって移動し（Fig. 2a 中下方向）、電荷収集される。電荷収集のための構造化イオン注入領域 (patterned implant) で信号電荷は電流に変換され、CMOS 回路で電圧信号として処理される。構造化イオン注入領域の

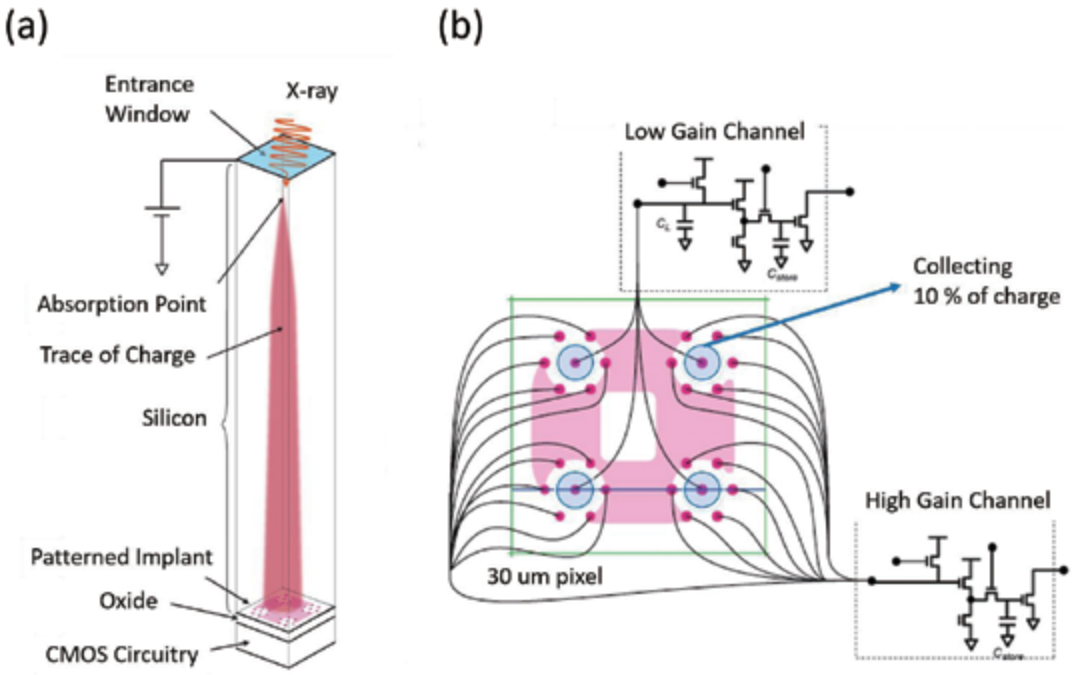


Fig. 2　SOPHIAS の単一画素の断面構造と信号電荷のドリフトの様子。

構造は (b) に、CMOS 回路との接続も含めて示した。薄青で示した円状の領域 4 か所は Low gain の CMOS 回路へ 10 % の信号電荷が、それ以外の領域から High gain の CMOS 回路へ電荷 90 % が伝送される。この構造により、小信号領域ではほぼすべての電荷を用いて高い S/N 比を実現し、大信号時にはデータの精度の悪化を招くことなく高いピーク信号の計測が可能となる。

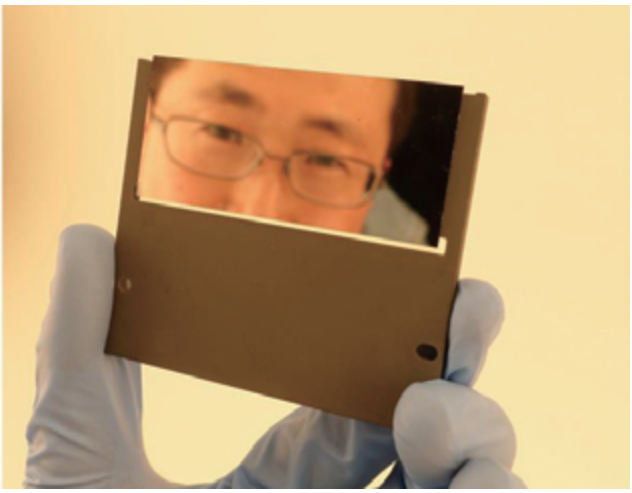


Fig. 3　SOPHIAS センサの外観。モノリシックセンサとして世界最大となっている

我々が考案したこの電荷分割方式は電力の消費を伴わず、極めて電力効率が良い。電荷積分アンプを 3 つ備えた伝統的な方式の検出器では 3 mW/pixel を消費している例 [8] もあるのに対し、SOPHIAS では 0.2 μW/pixel 以下の消費電力に抑制することができている。

実際に電荷分割方式の画素を実装したセンサの外観をに示す。また性能を Table 1 にまとめた。SOPHIAS は世界で初めて 1 万光子 /pixel のピーク信号を実現した検出器を実現することに成功した。

他の検出器のピーク信号性能を比較する場合、画素面積当たりのピーク信号を Figure of Merit (FoM) として比較することが妥当である。この指標では SOPHIAS は 12 photons/1 μm^2 @ 6 keV となる。現在注目されているスイスの Paul Scherrer

Table 1　Performance of SOPHIAS sensor

Parameters		Value	Units
Sensor	Pixel Size	30	μm
	Pixel Number	1.9 M (891 (V.) x 2157 (H.))	N/A
	Noise[1,2]	0.12	phs. at 6 keV X-ray
	Peak Signal[1,2]	12000	phs. at 6 keV X-ray
	Frame Rate	60	Hz

1) Results obtained for a sensor. 2) Peak signal is defined as maximum signal satisfying linearity of 3 %.

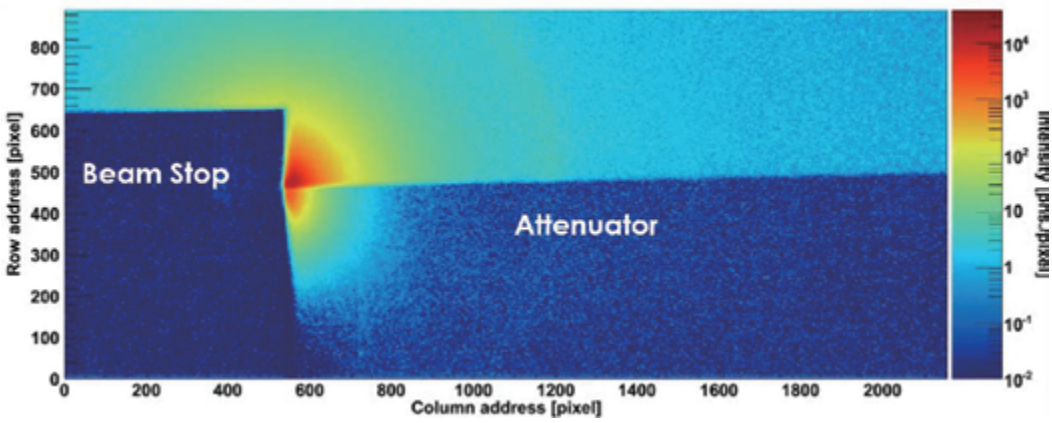


Fig. 4　SACLA で実際に散乱パターンを SOPHIAS で測定した結果（画像はログスケールで表示）。

Institut (PSI) が開発している Jungfrau 検出器は 3.7 photons/1 μm^2 @ 6 keV であり [9]、SOPHIAS の方が依然として 3 倍以上性能が良い、ということが言える。

SOPHIAS は現在、SACLA だけでなく SPring-8, Photon Factory のビームラインにおける放射光利用、群馬大学での粒子線治療への応用、大阪大学での非破壊検査応用などの利用も開始されており、今後の利用の拡大が見込まれている。

4. 謝辞

SOPHIAS 検出器の開発は 2007 年末から今日まで工藤統吾博士と共に遂行してきたプロジェクトです。この間、遠茂谷誠彦（現、㈱ヘルヴェチア）、辰巳知彦、小野峻（現 KEK）、桐原陽一（現 KEK）、広野等子（現ボン大学）、尾崎恭介、東末敏明、中川敏治、小橋侑輔、池田清秀、繁田和也、牧伸行、藤田良平、藤原邦弘、永禮高士、石野健太、香村芳樹、井上伊知郎、亀島敬、小林和生、松田裕二、寺西信一（現兵庫県立大学）小林俊之、片山哲夫、宇留賀朋哉、増永啓康、加部 泰三、鈴木基寛、松下 智裕、川瀬 守弘、豊川秀訓、植良啓、関澤央輝の皆々様にお世話になりました。

大面積センサの製造は難航しましたが兵庫県立大学の渡邊 健夫先生、木下博雄先生に半導体工学の専門家の立場からご支援をいただきました。ここに厚く感謝申し上げます。

開発・製造にあたっては、株式会社エイアールテック、京セラ株式会社、株式会社アークス（現ゴフェル株式会社）、株式会社ヘルヴェチア、株式会社中央電機計器製作所、株式会社ブルックマンテクノロジの方々にお世話になりました。またラピスセミコンダクタ株式会社の皆様には難しいセンサの製造技術開発を精力的に取り組んでいただきました。特に沖原将生、葛西大樹、三浦 規之、栗山尚也の皆様には多くの教え・ご協力をいただきました。ありがとうございます。

本研究は KEK の測定器開発室の SOIPIX プロジェクトに参加させていただいて得られた成果の一つです。KEK の SOIPIX プロジェクトの関係者の皆様、特に新井康夫先生、倉知郁生先生に大変お世話になりました。ありがとうございました。また測定器開発室の創設と運営に尽力された高崎史彦先生、幅 淳二先生他、諸先生に深く感謝いたします。

最後に理化学研究所の矢橋 牧名、石川 哲也両先生には常に励ましていただき、また開発の方向性について助言をいただきました。深く感謝申し上げます。

5. Reference

[1] X 線分野ではダイナミック・レンジとは検出可能な最大光子数を指す場合が多い。他の分野、特にイメージセンサでは計測可能な最大信号量とノイズの比であるので注意が必要である。本稿では混同を避けるため検出可能な最大信号量をピーク信号と定義し以下用いる。

[2] 最近の研究開発動向は、筆者らの下記の総説にまとめている。“X-ray imaging detectors for synchrotron and XFEL sources”, Takaki Hatsui, and Heinz Graafsma, IUCrJ, 2015, Vol. 2(3), p. 371-383.

[3] “Development of an X-ray Pixel Detector with Multiport Charge-Coupled Device for X-ray Free-Electron Laser Experiments”, Takashi Kameshima, Shun Ono, et.al, Review of Scientific Instruments, Vol. 85, (2014) Art. Num. 033110.

[4] “CSPAD-140 k: A versatile detector for LCLS experiments”, Sven Herrmann, et.al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Sec. A Vol. 718 (2013) 550-553.

[5] SACLA の成果については次を参照されたい。http://xfel.riken.jp/research/index.html

[6] “Hard X-ray free-electron laser with femtosecond-scale timing jitter”, Heung-Sik Kang et.al., Nature Photonics 11 (2017) 708-713.

[7] “A direct-detection X-ray CMOS image sensor with 500 μm thick high resistivity silicon”, T. Hatsui, M. Omodani, T. Kudo, K. Kobayashi, T. Imamura, T. Ohmoto，A. Iwata, S. Ono，Y. Kirihara，T.

Kameshima, H. Kasai, N. Miura, N. Kuriyama, M. Okihara, Y. Nagatomo, M. Nagasaki, T. Watanabe, Makina Yabashi, Proceedings of International Image Sensor Workshop, (2013) Art. Num. 3.05.

[8] "Performance of an LPD prototype detector at MHz frame rates under Synchrotron and FEL radiation", A. Koch et.al., Journal of Instrumentation, Vol. 8 (2013) C11001.

[9] "Calibration status and plans for the charge integrating JUNGFRAU pixel detector for SwissFEL", S. Redford et.al., Journal of Instruments, 11 (2016) C11013.

高集積陽電子検出器システム Kalliope の開発と実用化

高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所
小嶋　健児

Kalliope（カリオペ）というのは、我々の開発した高集積陽電子検出器システムのことで、KEK Advanced Linear and Logic-board Integrated Optical detectors for Positrons and Electrons の略称である。この名前は、ギリシア神話に登場する文芸の女神ムーサ（MUSE）たちの一人に掛けている。この検出器システムが開発された目的は、茨城県東海村にある、大型陽子加速器施設（J-PARC）の物質生命科学実験施設（MLF）で、世界最高瞬間強度のパルス Muon 源を使って、スピン緩和測定（muon spin relaxation: μSR）が可能になるためである。2018 年現在、MLF では 4 台の μSR 分光器（S1-ARTEMIS, D1 汎用 , U1A 超低速、CYCLOPS 高磁場分光器）に合計 200 セットぐらいの Kalliope が使われていて、日々の測定に稼働している。

1. Kalliope について

1.1. 何が独創的なのか

Fig.1 に Kalliope の 1 セットを既存の計測システムと並べて比べてみた。どちらもトリガー信号からのマルチヒット時間計測システムである。崩壊陽電子を受けたプラスチックシンチレータの発光を、光電子増倍管またはピクセル型雪崩フォトダイオード（p-APD）で検出し、波高弁別器（Discriminator）でデジタルパルス化して、時間計測器（TDC）でミュー粒子の飛来トリガーからの時間計測を行うシステムである。既存の検出器システムでは、光電子増倍管と NIM 規格の Discriminator、CAMAC や VME の TDC といったモジュール回路で行うので、この写真には含まれないビンやクレート電源が必須で、チャンネル数だけの結線を検出素子からモジュール回路まで長く引き延ばす必要があった。Kalliope では、特定用途集積回路（ASIC）、プログラム可能なゲートアレイ（FPGA）といった集積回路でモジュール回路を置き換えるので、軽量コンパクトになり、手のひらサイズのボードで 32 チャンネルの処理を行えるようになった。このボードにはイーサネットの口が付いていて、データが SiTCP パケットの形で送られてくる。Kalliope によって、信号

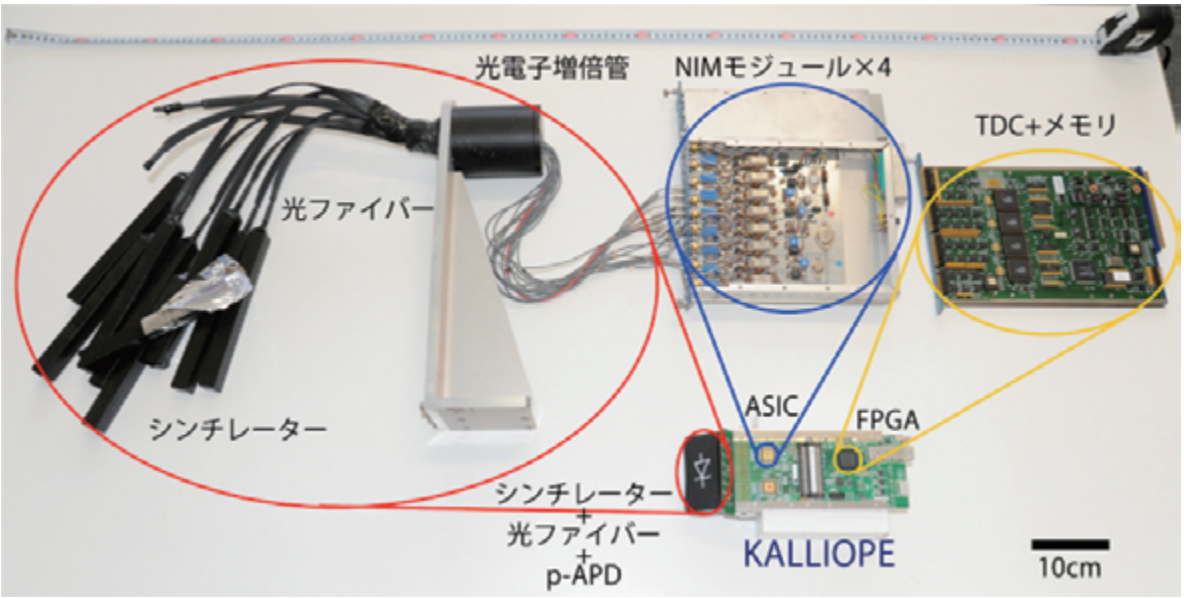


Fig. 1　従来型検出器と Kalliope の比較

処理回路を分光器に組み込むことができるようになったので、分光器はイーサネットケーブル1本を外せば、自由に動かせる可搬性を獲得した。Kalliopeの開発記[1-3]と技術・学術論文[4]も合わせて参考にしていただきたい。

1.2. Kalliopeの拡張性について

Kalliopeは、拡張性・汎用性が高いので、μSR分光器以外の用途に使われ始めている。例えば、

(1) シンチレータ周りの設計を変えて、Muoniumの超微細構造定数精密測定実験（MuSEUM）[5]、ガス中のMuon移動度測定実験[6]で使われている。
(2) デジタル基板の挙動を決めるファームウェアを変えて、大阪大学核物理センター（RCNP）の連続（DC）-Muon源、MuSICでも計測に使われている[7]。
(3) アナログ基板の入力部分を変えて、超伝導ディレイライン検出器をつなぎ、(2)と共同開発したDC版ファームウェアを使って、パルス中性子の飛行時間（TOF）によるエネルギー分解とイメージング測定に使われている[8]。
(4) 海外においても、RIKEN/RALやTRIUMFでの熱Muonium発生実験[9]でも用いられ、最近はISIS/RALグループが1000チャンネル級の分光器増強に採用を検討している[10]。
(5) MLFでのMuonic X線測定も、Kalliope用のデータ収集プログラムの拡張（とVME-ADCのファームウェア拡張）で実現されている。

などが挙げられる。

Kalliopeのスペックは、最小ビット＝1ナノ秒のTDCが1ボード32チャンネル、最大ヒットレートがDCモードでは2 Mcps/board、パルスモードなら、64μs時間窓に1チャンネル当たり1000ヒットのバッファという汎用TDCで、1セット価格が約十数万円である。ファームウェアの書き換えによっては、時間計測の関わる他の用途にも利用可能という拡張性を持っている。

1.3. Kalliopeの将来について

現行Kalliopeのスペックは、MLFのパルスMuonビームを用いる限り十分である。しかし、DC-Muon源や中性子イメージングに対しては、現在の時間分解能（1ナノ秒）は不十分である。また、DCモードのヒットレート耐性（2 Mcps/board）は、SiTCPの帯域（1Gbps）の1/10程度のスピードに留まっており、ボトルネックはデータ転送部分以外にある。この2点を改善するため、現在、Kalliope-II開発計画が進んでいる。その概要は、

(1) ASICの製作プロセスを変え、帯域を3GHzに上げる（現行ASIC ＝ Volume2012/2014は100MHzの帯域）。
(2) デジタル基板にMByteクラスのデータバッファをつける（現行デジタル基板のバッファは64kByte=16khit）。

である。

Kalliope-IIのASICはFGATI（Front-end for GHz Application using Trans- Impedance amplifier）と呼ばれていて[11]、既に1チャンネルのテストチップが納入され、平成30年度に動作試験を行う予定である。TDCの時間分解能は、パルス応答の立ち上がり時間で決まり、今までのVolume2012 / 2014より10倍程度改善した、時間分解能の計測が可能になると期待している。

これまでの考察で、現在のKalliopeのヒットレート耐性（2 Mcps/board）は、デジタル基板のバッファサイズで決まっているらしいことが分かってきた。具体的にはデータ収集コンピュータのハードディスクのシークタイム中（～10ミリ秒）に来るデータ量をデジタル基板が保持できないためデータ溢れが生じているのである。これを改善するにはFPGAに外付けメモリを用意するだけで良い。実際、MLF中性子で利用されているNeuNETには、数MByteのDRAMが付いていて、数秒間のデータを保持できるようになっている。これをKalliope-IIは真似るだけでヒットレート耐性もSiTCPデータ転送帯域を使い切って、現在の約10倍になるはずである。

電気回路における GHz は、感覚的には航空機における音速のようなもので、どちらもこれを超えると様々な問題が生じてくる。現行の Kalliope は、いわばプロペラ機で、完成されてはいるが、音速は超えていない。現在開発が始まっている Kalliope-II は超音速機で、今まさに、ジェットエンジン（＝ FGATI-ASIC）の開発が始まったところである。予算の調達状況によるが、これから機体（＝次期デジタル基板）の開発を行う。

2. 小柴先生とうなぎの筏

この機会に筆者の 20 年前の思い出を書かせていただこうと思う。実は、小柴先生に南千住のうなぎをご馳走していただけるはずの話があるのだ。

1996 ～ 1997 年度、筆者は JSPS の海外特別研究員として米国ニューヨークのコロンビア大学に滞在していた。1996 年か 1997 年か、もう定かではないが、ワシントンの JSPS オフィスのセンター長をしていらした小柴先生が、コロンビア大物理学科にセミナーに来られた。カムランドかその次の計画（ドーナッツと呼んでいたような気がするが？）の話だったと思う。セミナーの後、日本人で集って、ミッドタウンの日本料理屋に繰り出すことになっていて、僕と妻は小柴先生の案内役を仰せつかった。ホテルに着いて、まだ時間があったので、部屋で 30 分ぐらい雑談した後、料理屋に行こうとしたのだが、雨が降ってきてタクシーは捕まらず、5 番街など数字で呼ばれる通りの間に文字だけの通りが何本も挟まっていることを知らず、距離の見積もりを間違えて、結局、小柴先生を 5 ブロックぐらい歩かせて、15 分ぐらい遅刻して料理屋に到着してしまった。ひどい案内役だった。

それでも食事中、小柴先生は上機嫌で「小嶋さん、日本に帰ってきたら遊びにおいで。うなぎをご馳走してあげよう。南千住に気に入った店があるんだ。筏（いかだ）みたいに 3 枚ぐらい繋いであるやつ、うまいぞ。」などと言ってくださった。豪快でフレンドリー・オープンなお人柄は、戦後の混乱期を生き抜いた世代に特有な力強さそのものかもしれない。

その後、2 年も経たないうちに、僕は東大工学部の助手となったのだが、高エネルギー物理とは縁遠いので、何だか遠慮して、小柴先生にご挨拶しなかった。そして、2002 年に小柴先生がノーベル賞を受けられた時に、最初に思ったのは「しまった、筏をご馳走になっておけばよかった」ということだった。妻と一緒に「うなぎはもう無理だね」と残念がった。

今回、その 15 年後、小柴先生の名前を冠した賞をいただいたのをきっかけに、今度こそご挨拶に行こうと思う。覚えておられるかどうかわからない。覚えていただいていたとしても「20 年前の約束なんて時効だよ」と言われそうな気もするが（笑）。

謝辞

Kalliope の開発と実用化には KEK 素核研の田中真伸氏、内田智久氏、庄子正剛氏、村上 武氏、池野正弘氏、齊藤正俊氏、KEK 計算科学センターの鈴木（山形）聡氏を始めとする Open-It のコラボレーションでようやく可能になりました。また、ハードウェアの設計･設置、ASIC の良品検査、FPGA ファームウェアの改善、制御ソフトの開発には業者の方々（特にスズノ技研、ツジ電子、ジー・エヌ・ディー、Bee Beans Technology、ヴィジブルインフォメーションセンター）のお世話になっています。ビームを使った分光器コミッショニングは KEK- 物構研 μSR グループや JAEA- 先端研 μSR グループの方々の献身的なシフト参加なくしては成り立ちませんでした。以上の方々及び、小柴賞に推薦してくださった、門野良典氏にも、この場を借りて感謝の意を表したいと思います。

参考文献

[1] 小嶋健児、日本中間子科学会誌「めそん」**40**, (2014), 30-36.

[2] 小嶋健児、日本中間子科学会誌「めそん」**41**, (2015), 31-42.

[3] 小嶋健児、日本中間子科学会誌「めそん」**44**, (2016), 46-50.

[4] K.M. Kojima *et al*. *J. Phys*: *Conf. Ser*., **551**, (2014), 012063; K.M. Kojima *et al*. *JPS Conf. Proc*. 21, 011062 (2018).

[5] K. Shimomura. *AIP Conference Proceedings*, (2011) ; S. Kanda for the MuSEUM Collaboration, *Proceedings of Science*, *PoS* (PhotoDet2015) (2016) 039; S. Kanda, *Proceedings of Science*, *PoS* (INPC2016) (2017) 170.

[6] S. Matoba *et. al*., 30th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (2017); paper in preparation.

[7] D. Tomono *et al*. *to appear in JPS Conf. Proc*. (2018).

[8] H. Shishido *et al*. 17th international workshop on Low Temperature Detectors (LTD17) (2017); T. Ishida *et al*. 15th International Conference on Advanced Materials, IUMRS-ICAM2017 (invited talk); 4th International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications (ISAMMA) (2017); paper in preparation.

[9] S. Okada *et al*., *RIKEN Accel. Prog. Rep*. (2016) 49.

[10] S. Cottrell and P. Baker, *private communication* (2017).

[11] 田中真伸、FGATI デザインメモ (2017).

SOI 技術を使った革新的ピクセルセンサーの実現

高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所、[a] 先端加速器推進部
新井康夫、[a] 倉知郁生

1. はじめに

この数十年で、可視光に対するイメージセンサーは大幅な進歩を遂げ、今やあらゆる場所に半導体イメージセンサーが用いられている。一方、放射線に対する 2 次元センサーは、崩壊点検出器、ピクセル検出器等と呼ばれるが、こちらも大幅な進展を見せながらも、まだ可視光センサーと比べるとその歩みは遅い。

現在 CERN の LHC 実験で用いられているピクセル検出器 [1] は、センサー部の半導体と読み出しエレクトロニクス部の集積回路とを大量の金属バンプにより接続したハイブリッド型であり、性能、量産性、コスト等多くの課題を抱えている。これをバンプボンディング無しで、1 枚のウエハーから半導体プロセスのみで作るモノリシック化を目指し多くの R&D が行われてきたが、十分な性能を実現することは難しかった。

これは、可視光検出には表面に数ミクロンの空乏層があれば良いが、量子線（X 線、電子、荷電粒子、、、）を検出するためには、多くの場合高電圧をかけ厚い空乏層を作ることが必要で、これを低い電圧で動作する CMOS 集積回路と一体化することが難しかった為である。また、裏面照射や薄い不感層、強い放射線耐性等の厳しい要求も求められ、半導体プロセスの細部にわたる開発が必要となり、限られた予算内でこれらすべての事を行うということが難しかった。

上記のような課題を克服するため、我々は Silicon-on-Insulator（SOI）技術を用いて、センサと CMOS 回路を一体化した検出器を開発した。SOI は 2 つのシリコン層を持ち、両者は異なった特性を持たせることが可能である。これにより高感度センサーと画素内にアナログ増幅やデジタル処理回路を両立させたピクセル量子線検出器が可能になり、これまでにない新しい検出方法への道を開いた。モノリシック化する事により、大幅なコストダウンも見込め、これまで考えられなかった使い捨て利用も可能となる。

我々は、国内半導体メーカの協力を幸い得ることが出来、2005 年の KEK 測定器開発室の立ち上げと共に SOI 検出器プロジェクトをスタートし、2013 年度からは、科研費新学術領域研究「3 次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」[2] を展開した。ここでは、SOI 検出器をベースに新しいサイエンスを切り拓く事を目的に、物質・宇宙・放射光等様々な科学分野の興味を持つ研究者が集まり、工学系の研究者・技術者をも含んだグループとして活動してきた [3]。また、多くの検出器開発を効率よく行うために、技術交流を行うとともに毎年 1 ～ 2 回の相乗りプロセス（MPW）ランを行った。

2. SOI ピクセルプロセス

2.1. 背景

透過力の強い量子線を高感度に検出するためには、厚い空乏層が無ければならない。この為、センサ部は高抵抗率の基板を使用し高電圧（~100V）を印加する事により厚い空乏層を実現する必要がある。

しかしながら、この事により生じる電場がトランジスタ動作に影響してしまう（Back Gate Effect）。また、センサ、アナログ／デジタル回路をピクセル内の狭い領域に共存させる必要があるが、両者の間の容量結合によりクロストークや信号の発振を引き起こす可能性がある。さらには、高い放射線環境下で使用されるので、これに対する強い耐性を持たせる事も必要とされる。

我々は、ラピス・セミコンダクタ（株）社の 0.2 μm CMOS Fully Depleted（FD）-SOI プロセス [4] を元に SOI ピクセル検出器の開発を行ってきた [5]。まず Back Gate Effect に対しては、埋め込み酸化

膜（BOX）層の下に Buried Well 導電層を作る事により電場を遮断する事で解決した。しかしながら Buried Well だけでは、容量結合に関して却って悪化させる事があるので、我々はトランシスタの下部にもう一層のシリコン層を埋め込んだ Double SOI 技術を開発した [6]。

2.2. Double SOI

通常の Single SOI ウエハーに、新たに中間シリコン（Middle Si）層を加えた Double SOI ピクセル検出器の概念図を図 1 に示す。またプロセスの仕様を表 1 に、TEM 断面図を図 2 に示す。

これにより、

- トランジスタの下に Buried Well を設けなくとも Back Gate Effect を抑制出来る。
- 中間 Si 層の電位を固定する事により、センサと回路間の容量結合を減少させる事が出来る。
- 放射線照射により BOX 中に捕獲された正孔の影響でトランジスタ特性が変化してしまう現象に対し、中間 Si 層に電圧を印可する事で補償し、放射線耐性を強化出来る。
- 中間 Si 層を第 3 のシリコン層として、新たな機能を持った検出器の可能性が広がる。

といった特徴が得られる。

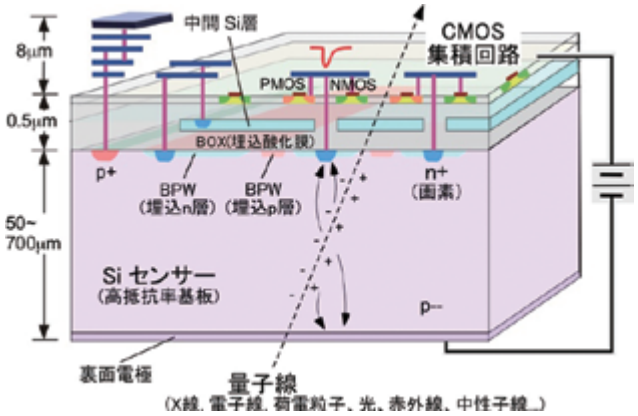


図 1　Double SOI 技術により 3 つの活性化 Si 層を持たせた SOI ピクセル放射線イメージセンサの概念図（p 型基板の場合）。

表 1　Double SOI ピクセル検出器用プロセス仕様

Wafer	200 mmϕ diameter, 725 μm thick. Thin down to 50~500 μm after process with backside doping.
Top Si	Circuit layer. 0.2 μm low-leakage fully-depleted SOI-CMOS, 1 poly, 5 metal layers. Body-floating, body-tie transistors. MIM (1.5 fF/μm^2) and DMOS capacitors. Core (I/O) Voltage = 1.8 (3.3) V. Cz, ~18Ω・cm, p-type, ~40nm thick.
Middle Si	Shield layer; n-type 150 nm, < 5 Ω・cm
Buried Oxide (BOX)	Two BOX layers between Si layers; 145 nm thick.
Handle wafer	Radiation sensing layer. FZ p-type(100) > 5 k Ω・cm

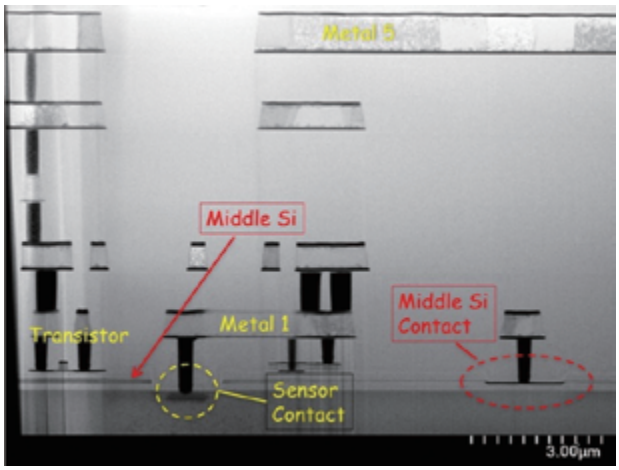


図 2　Double SOI ウエハープロセス後の TEM 断面図。

クロストークの影響を調べる為に、ピクセル内のカウンタにクロックを供給し、センスノードの Preamplifier - Shaper amp の出力信号を観測した様子を図 3 に示す。Single SOI ではクロックエッジで、出力に大きなクロストーク信号が現れてしまうが、Double SOI にすることでこの影響は 20 分の 1 以下にする事が出来た [7]。

また電荷感応型アンプを用いた場合、センスノードとアンプ出力間のフィードバック容量の寄生容量を減少させる事が出来るので、全く同じレイアウトのアンプでもゲインを 3 倍に増大させる事が出来た（図 4）[8]。

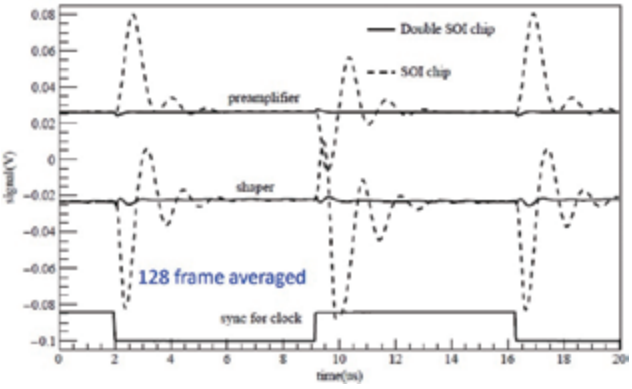


図 3　クロック信号からピクセルアンプ出力へのクロストークの様子。Double SOI ではクロストーク信号の大きさが 20 分の 1 に減少した。

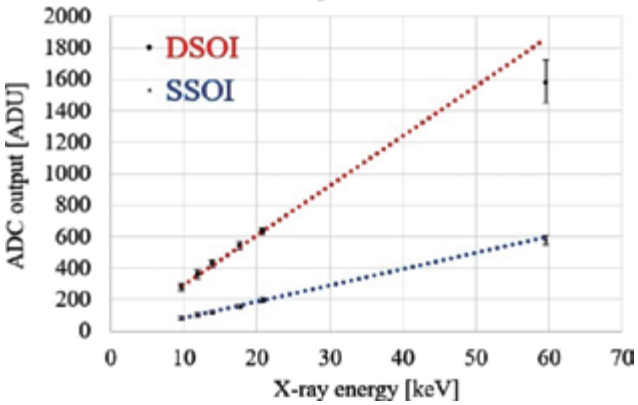


図 4　ピクセルアンプのゲイン。Single SOI では 20 μV/e- のゲインだったものが、Double SOI では寄生容量が減少したことから 61 μV/e- に増加した。

2.3. 放射線耐性強化

SOI ではトランジスタ厚さが 40nm と薄いため放射線による単発効果（Single Event Effect）が起こる確率は非常に低いが、厚い BOX 層があるため BOX 中にホールが溜まり、トランジスタの閾値が下がってしまう蓄積線量効果（Total Ionization Effect）が問題となる（図 5 左）。これに対し、Double SOI では中間 Si 層に負電位を与える事により閾値を照射前の状態にほぼ戻す事が出来る（図 5 右）。

また、中間 Si 層に高電圧パルスを印加し BOX 層中に電子を注入する事でも回復が見られる [9]。さらには、主に PMOS トランジスタで見られるトランジスタ・サイドウォール部へのホール蓄積によるドレイン電流減少の影響に関して、Lightly Doped Drain（LDD）領域の不純物濃度を調整することで改善させた [10, 11]. 検出器の設計により多少異なるが、これらの改良により、現在は 1MGy（Si）程度の放射線環境下まで使用できる見通しがついた。

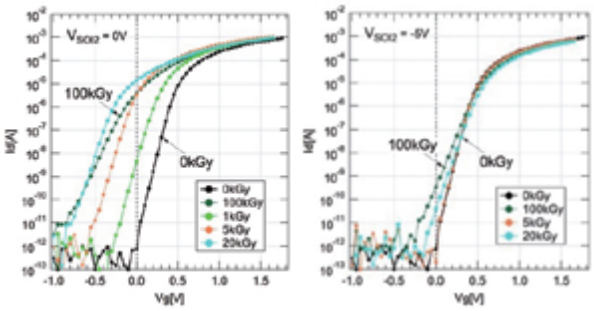


図 5　NMOS の Id-Vg 特性のガンマ線照射による変化と V_{SOI2} 電圧による変化。この例の場合、V_{SOI2} 電圧を -5V 印可する事により 100 kGy（Si）の放射線照射後に於いても照射前に近い特性を維持出来た。

2.4. PMOS-NMOS アクティブ共有化

2 次元検出器では、画素サイズをあまり大きくせずに、様々な機能をピクセル内に持たせる為、高集積化が重要な鍵となる。しかしながら、より高精細なプロセスでは、動作電圧が低くなり、アナログ回路に広いダイナミックレンジを持たせる事が難しくなる。

SOI では素子分離のための well 構造が必要無いため NMOS と PMOS とを同一のシリコン島上に形成する事が可能である（図 6）。ソース／ドレイン領域の上は Salicide 化されているので、コンタクトを共有することも可能である。このようにして、0.2 μm プロセスにおいても、0.13 μm プロセスで設計したレイアウトと同等以上に高集積化できている。

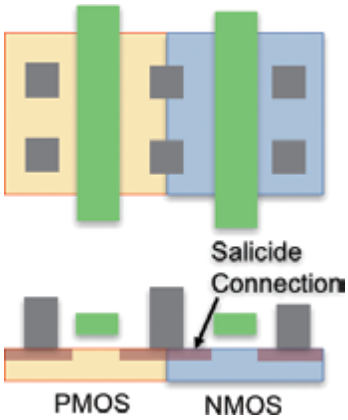


図 6　NMOS と PMOS のアクティブ領域共有化。Well 構造が不要な為、レイアウト面積を非常に小さく出来る。

2.5. Pinned Depleted Diode（PDD）構造

センサ・ノイズを抑えるため、また長時間露光を可能とする為には、センサのリーク電流を低く抑える事が重要である。リーク電流の発生源としては、BOX とセンサ部の界面で発生する表面電流が大きな割合を占める。

これを抑える為、界面を埋め込み層で中性化しつつ、電荷を小容量のセンスノードに集める構造を開発した [12]。図 7 に PDD の断面構造を、図 8（左）にポテンシャル構造を示す。これにより、リーク電流を大幅に削減する事が出来、電荷収集効率も向上させられた。

図 8（右）に 55Fe からの X 線エネルギーを測定した図を示す。ノイズレベルは 11 電子となり、リーク電流は 56pA/cm^2 にまで減少した。スペクトル中のピークはほぼテールが無く、発生した電荷がほぼ全てセンサ・ノードに吸収されていることを示している。

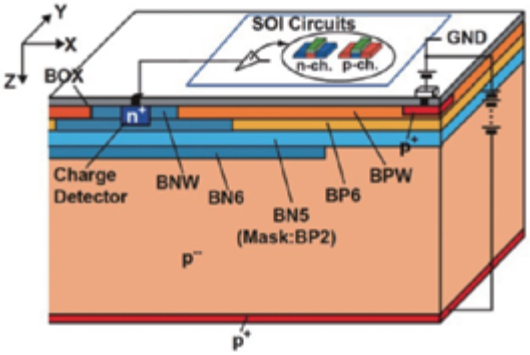


図 7　PDD 構造の断面図。

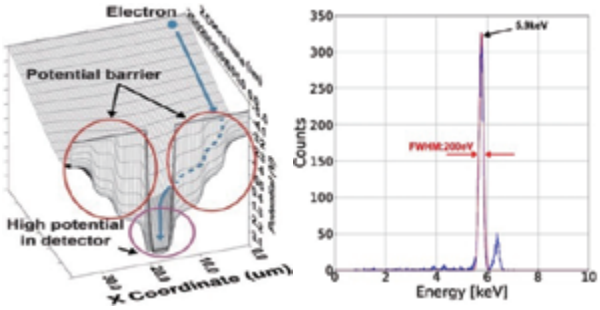


図 8　（左）PDD 構造のポテンシャル。（右）PDD 構造のセンサで測定した Fe55 の X 線エネルギースペクトル。

3. 検出器例

上に述べたように KEK では毎年 SOI MPW ランを主催しており、これを通じてこれまでに様々な検出器が開発されてきた。ここでは、そのうちのいくつかについて紹介する。

3.1. INTPIX

SOI プロセスを用いて最初に開発したのが積分型ピクセルで、INTPIX という名前がついている。INTPIX4 のピクセルレイアウトとそれを用いて撮影した小魚の X 線 CT 像を図 5 と図 6 に示す。この検出器は、ピクセルサイズが 17 μm で市販の X 線検出器よりも格段に良い空間分解能を示した。

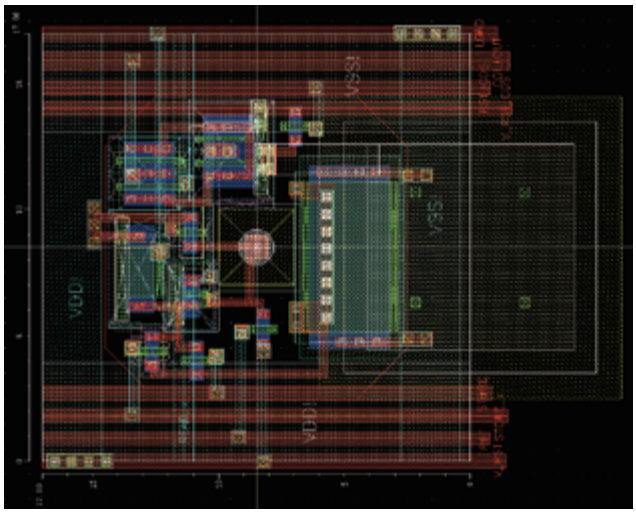


図 9　積分型 SOI 検出器 INTPIX4 のピクセル部レイアウト。17 μm 角内に蓄積用コンデンサ、Correlated Double Sampling 回路等を含む。

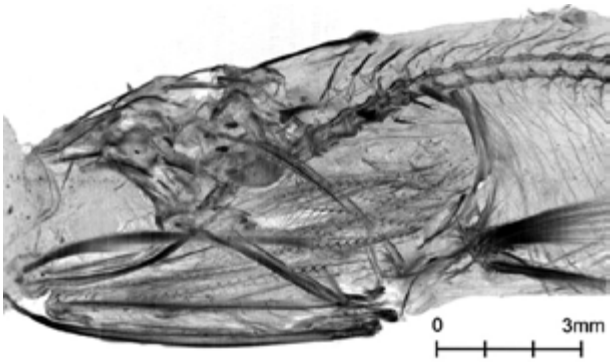


図 10　放射光からのＸ線を用いINTPIX4（512 x 832 pixels）検出器で撮影した煮干しのＸ線３次元CT像。

3.2. FPIX

これまでに開発した中で最も小さい8μm角ピクセルサイズを持ったFPIX（Fine PIX）検出器を用いた位置分解能測定実験が、米国フェルミ研究所の120 GeV/c陽子ビームを用いて行われた。4枚のFPIX検出器が並べられ、各検出器で測定して得られた測定データより電荷重心を求める事により、ひとつひとつの粒子の通過位置が決められた。3枚の検出器データから推定される軌跡の位置と残りの4枚目の検出器で得られた位置との残差から、位置決め精度0.7μm以下という値が得られた。この値は、半導体検出器で得られた値としては、世界最高の位置分解能である[13,14]。

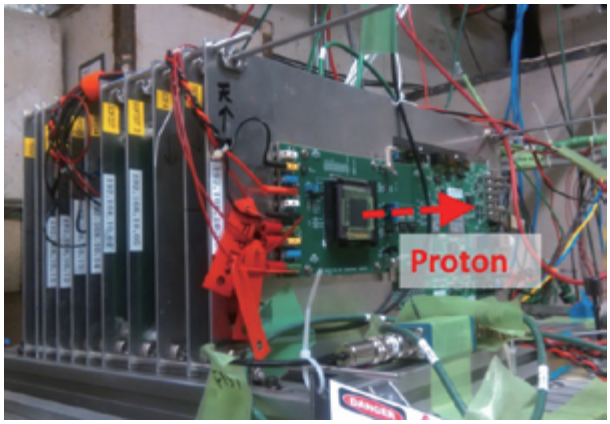


図 11　高エネルギー陽子ビームを用いた荷電粒子の軌跡の位置分解能測定実験の様子。FPIXを用いる事で、世界で初めて1μmを切る分解能を達成した。

3.3. その他のSOI検出器

上記の他、いくつかの検出器が開発され、一部はすでに実際の実験で使われている。

Ｘ線天文衛星用に開発されているXRPIX[15]はＸ線のヒットによりトリガー信号が出せ、周りを囲んだシンチレータとの反同時係数を行うことで宇宙線によるバックグラウンドを落とすことが出来る。

また、XFEL・放射光実験用に開発されたSOPHIAS検出器[16]はマスクサイズよりも大きな約3cm × 6cmという大面積検出器を作成するために重ね合わせ露光（Stitching exposure）が行われ、今回同時に小柴賞を受賞している。

日本に建設が計画されている全長約30 kmのInternational Linear Collider（ILC）[17]向けの崩壊点検出器SOFIST[18]はKEKを中心に開発されている。SOFISTではピクセルサイズを小さく（~20μm角）保ちながら、多数のヒット情報をピクセル内に蓄積しなければならない為、現在のSOIPIXの上にさらに回路層を3次元的に積層することも検討されている。

SOI技術ではウエル構造がない為、同じ線幅の半導体技術を使っていても、バルクCMOS技術よりも回路面積を小さくすることが出来、今後さらに様々な検出器が開発されるものと期待される。

4. まとめ

LSIの高性能化のために開発されたSOI技術は、2次元量子線検出器に最適な構造を持っている。しかしながら、厚い空乏層を作るための高電圧印加や放射線耐性の問題があったが、我々はBuried WellやDouble SOIという技術を開発することで、これらの課題を克服して来た。また、リーク電流を抑え電荷収集効率を上げる為に新たにPDD構造を実現した。

これらの開発成果は、高エネルギー加速器実験における高精度崩壊点検出器、放射光実験における広ダイナミックセンサ、X線衛星用検出器等に向け開発・実用化されている。

今後はCMOS光センサで開発された様々な技術を取り入れ、低ノイズ、高速読み出し等の性能を一層向上させていきたい。また同時に、より高強度の放射線環境下でも使用できるよう、改良を加えていく予定である。

5. 謝辞

今回の高エネルギー加速器科学研究奨励会「諏訪賞」受賞にあたり、これまで一緒に研究を行ってきたSOIPIXグループメンバーおよびラピスセミコンンダクタ（株）の皆様に感謝します。また研究の多くはKEK測定器開発室および科研費で支えられていますが、特にSOI検出器に関しては科研費新学術領域研究（25109001）の助成を受ました。またセンサやLSI回路設計にあたっては、東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通し、ケイデンス株式会、シノプシス株式会社 、メンターグラフィクス株式会社の協力で行われました。

---

[1] X. Llopart, et al., "Medipix2: a 64-k Pixel Readout Chip With 55-um Square Elements Working in Single Photon Counting Mode", IEEE Trans.Nucl. Sci. Vol. 49, pp. 2279-2283, 2002.

[2] 科研費新学術領域研究「3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開」、http://soipix.jp.

[3] Y. Arai and I. Kurachi, “Radiation Imaging Detectors Using SOI Technology”, Synthesis Lectures on Emerging Engineering Technologies, Morgan & Claypool Publisher（2017/2/15）, ISBN-13: 978-1627056960.

[4] F. Ichikawa, et al., "Fully depleted SOI process and device technology for digital and RF application", Solid-State Electronics, 48（2004）999-1006.

[5] Y. Arai, et al., "Developments of SOI Monolithic Pixel Detectors", Nucl. Instr. and Meth. Vol. 636, Issue1 , Nov. 2010, pp. S31-S36. doi:10.1016/j.nima.2010.04.081.

[6] Y. Arai, “SOI Monolithic Pixel Detector Technology,” PoS（Vertex 2016）029.

[7] Y. Lu, et al., “First results of a Double-SOI pixel chip for X-ray imaging”, NIM A831（2016）44-48.

[8] T. Miyoshi, et al.,“Front end electronics of double SOI X-ray imaging sensors”, 2017 JINST 12 C02004, doi:10.1088/1748-0221/12/02/C02004.

[9] M. Yamada, et al., “Compensation for radiation damage for SOI pixel detector via tunneling”, NIM A831（2016）309-314. doi:10.1016/j.nima.2016.04.110.

[10] I. Kurachi, et al., “Analysis of Effective Gate Length Modulation by X-Ray Irradiation for Fully Depleted SOI p-MOSFETs”, IEEE Trans. on Elec. Dev., Vol. 62, No. 8, 2015. doi:10.1109/TED.2015.2443797.

[11] I. Kurachi, et al., “Tradeoff Between Low-Power Operation and Radiation Hardness of Fully Depleted SOI pMOSFET by Changing LDD Conditions,” IEEE Trans. on Elec. Dev., Vol. 63, No. 6, pp. 2293-2298, 2016. doi:10.1109/TED.2016.2552486.

[12] H. Kamehama, et al., “A Low-Noise X-ray Astronomical Silicon-On-Insulator Pixel Detector Using a Pinned Depleted Diode Structure”, Sensors 2018, 18, 27; doi:10.3390/s18010027.

[13] Press Release（2017.6/23）. http: www.tsukubai.ac.jp/attention-research/p201706231400.html.

[14] D. Sekigawa, et al., “Fine-Pixel Detector FPIX Realizing Sub-micron Spatial Resolution Developed Based on FD-SOI Technology”, International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics（TIPP2017）, May 22-26, 2017, Beijing China. to be published in Springer Proceedings in Physics.

[15] A. Takeda, et al., "Development of an Event-driven SOI Pixel Detector for X-ray Astronomy, - Improvement of an Intra-chip Readout Circuit for Low Noise Performance -", 14th The Vienna Conference on Instrumentation（VCI2016）, 2016.

[16] Y. Hatsui, et al., “A direct-detection X-ray CMOS image sensor with 500 um thick high resistivity silicon”, Proceedings of International Image Sensor Workshop, 2013, Art Num 3.05. http://www.imagesensors.org/Past%20Workshops/2013%20Workshop/2013%20Papers/03-5_058_hatsui_paper.pdf.

[17] International Linear Collider project（ILC）. https://aaa-sentan.org/ILC/.
[18] Shun Ono, et al., "Development of a pixel sensor with fine space-time resolution based on SOI technology for the ILC vertex detector", 14th The Vienna Conference on Instrumentation（VCI2016）, Nucl. Instr. and Meth. A, March 17, 2016.

各種安定化電源装置の開発および《ノイズカットトランス ®》の発明

株式会社電研精機研究所
矢ヶ﨑　文昭

1. はじめに

この度は大変栄誉ある熊谷賞を賜り、まことにありがとうございます。心底より御礼申し上げます。

2. 加速器科学から生まれた《ノイズカットトランス ®》

2.1 弊社の現在の事業内容

さて、私どもの事業は “EMC 技術の明日をひらく” を理念として、電気的ノイズを防止することを柱としています。

具体的には、ノイズ防止型の精度の高い電源装置のご提供およびコンサルティング業務に全力を注いでいます。このような事業を営むようになった経緯として加速器研究分野との深い関わりがありますので、その点について触れたいと思います。

2.2 創業当初からの加速器科学との関わり

弊社は 1960（昭和 35）年の創業よりこれまで、6500 台余の製品を高エネルギー加速器研究機構、日本原子力研究開発機構、理化学研究所等、多くの加速器研究施設へ納入してまいりました。

特に創業から 20 年程は、お引き合いの殆どが「こういう振る舞いをする、このような装置を創れないか」というご要求にお応えして、前例の無い研究実験用装置を開発することでありました。

代表的なものを Fig. 1 ～ 5 に示します。

2.3 ノイズ防止技術の創出

Fig. 1 に示した光電子増倍管陽極電源用 LMD-H 型直流高圧自動定電圧装置（以下、フォトマル用電源装置と略記）は、創業間もない頃、高エネルギー加速器研究機構の前身である東京大学原子核

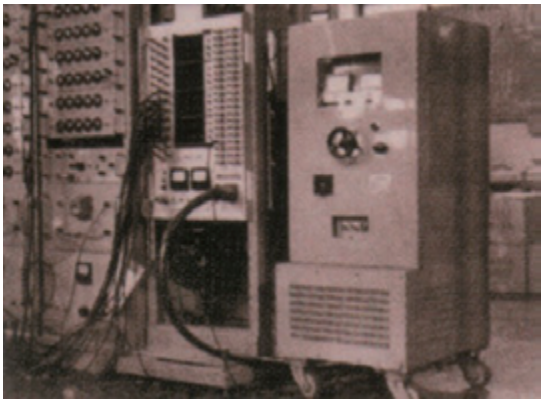


Fig. 1　LMD-H 型 直流高圧自動定電圧装置
消耗せず、僅少の温度ドリフト、経時間的に特性変化の無い高安定精度の高圧電源。
（納入先：東京大学原子核研究所）

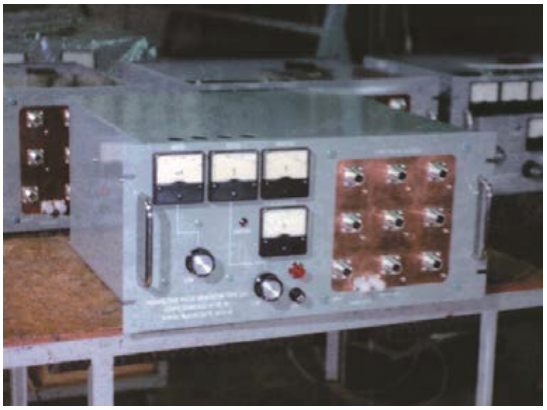


Fig. 2　D 型 超高速高圧パルス発生装置
30ns 以下で立ち上り、ジッタの少ないパルス発生装置。主にスパークチェンバー用にご採用いただいた。
（納入先：高エネルギー物理学研究所）

Fig. 3　K101 型 80kV 超高速高圧パルス発生装置
キッカー電磁石励磁用パルサーの同期蓄電装置。12GeV 陽子シンクロトロン等にご採用いただいた。
（納入先：高エネルギー物理学研究所）

Fig. 4　サイクロトロンイオン源制御装置
右から、フィラメント電源、アーク電源、安定化電源。アーク放電に伴うノイズを閉じ込め、周辺への影響を防いでいる。サイクロトロンの加速用電子を発生させる電源としてご採用いただいた。
（納入先：大阪大学核物理研究センター）

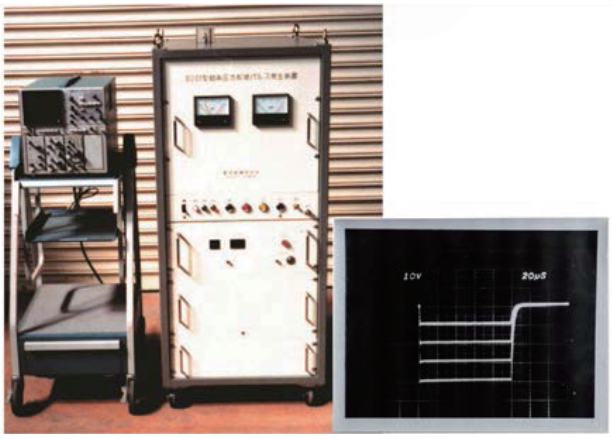


Fig. 5　B 型 超高圧方形波パルス発生装置
寄生振動の無い正確なフォームの 50kV 級超高圧波形を発生できる装置。主に電気絶縁物質の研究開発にご採用いただいた。
（納入先：理化学研究所）

研究所よりご依頼をいただきました。この装置は「極めて高い安定精度」「経時間的に特性変化の無いこと」「僅少の温度ドリフト」等のご要求がありました。

実はこの開発の最中に、弊社の将来に重大な影響を与える出来事が生じます。それは納品したこのフォトマル用電源装置がノイズに悩まされて、それを解決しない限り検収があがらないという事態に陥ったことです。

私どもも、あらゆる種類のアブソーバーやラインフィルター（ノイズフィルター、LC フィルター、EMI フィルターの類）を試しましたが、どうにも上手く行きませんでした。条件を固定した社内試験では高い効果を示すラインフィルターでも、電源ラインのインピーダンスは場所ごとに固有の値を持っているため、諸条件が異なる設置場所に持ち込むと特性が変わり効果が無くなってしまったのです。そこで一度行き詰まってしまい、たとえ電源インピーダンスが変わったとしても影響を受けず、いかなる場所でも確実に効果のある、そのような理想的なノイズ防止素子を自ら開発するしかない状況になりました。

こうした経緯で開発いたしましたのが、磁気結合を用いて電源ラインをアイソレート出来る、全く新しいノイズ防止素子でした。これが現在弊社の主力製品の一つである《ノイズカットトランス®》の最初期のモデルであります。

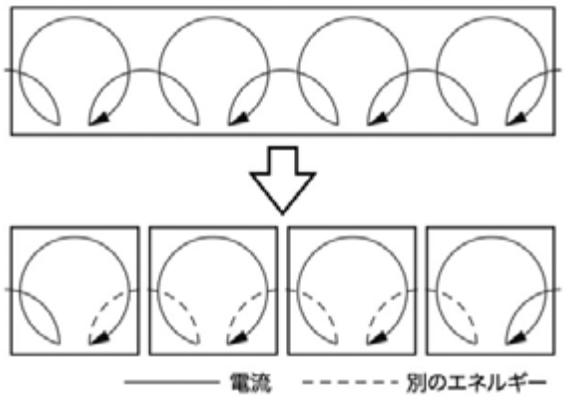


Fig. 6　回路のアイソレート
電流の動作ループごとに回路を分離・絶縁し、電気エネルギー以外のエネルギーで相互に作用を伝達する。

創業者矢ヶ﨑昭彦はこの頃のことにつきまして、「核研は大変風通しが良く、製品を性能本位で見て戴けたため、愚直に取組み、良い物を開発してお応えできれば、きちんと評価して下さった」「人格的にも心を洗われる様な方達に、また同年代の若い方達と手づくりするようにパートナーとして扱ってもらえた」と書き残しています。

Fig. 7　原子核実験エレクトロニクス放射線測定機器回路図集
Toranomaki と呼ばれていた林厳雄先生編纂の本書に、フォトマル用電源装置が回路図と共に収録された。また、山口尚先生によって「日本物理学会誌」（第 16 巻 8 号 p.557 ～ p.558）にも同様に掲載された。

3. ノイズ障害の歴史と今後の展望

3.1 ノイズ障害の頻発・拡大

研究実験用装置の特注品を、一品料理のように開発することを事業としていた弊社に、転機が訪れたのは 1980 年前後です。

この頃、半導体の進化に伴いコンピューターのパーソナル化が急激に進み、その心臓部の集積回路がノイズに対し敏感になるにつれ、次第にノイズ防止技術が広く一般にも必要となってまいりました。

加速器科学向け装置開発の中で培ったノイズ防止技術が、この時期に脚光を浴びることとなります。この頃から、弊社の事業も徐々に社会の要請にお応えするかたちで、ノイズ障害の防止および対策製品の量産に軸足を移してまいりました。

更にその後も皆さまご周知のとおり、エレクトロニクス技術の発展は日進月歩で進み、同時にノイズ障害も益々増加して、今日ではノイズ防止技術は世の中になくてはならないものになりました。

3.2 現在生じているノイズ障害の例

企業のみならず、一般家庭においても節電への意識が高まり、省エネ化が進んでいます。小型軽量・低消費電力・高効率化を実現するためのスイッチング電源は、多種多様な機器（例:LED 照明、空調機器、生産設備、インバータモータ、サーボシステム等々）に搭載され、あらゆる場面でノイズ発生源となっています。また、自然現象である雷や静電気も、ノイズ発生源となります。

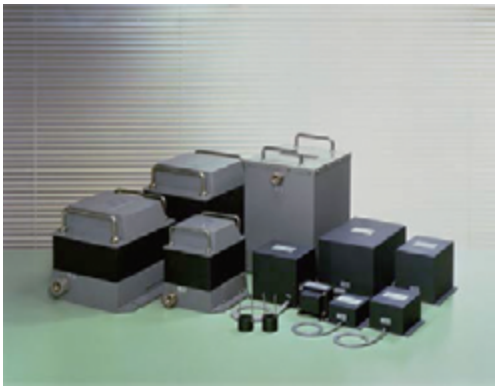


Fig. 8　一般市販を開始した頃の《ノイズカットトランス ®》

一方、IoT 技術に代表される微細な信号を扱う機器（例：パソコン、音響・映像機器、通信機器、制御機器、半導体製造装置、測定・分析・検査装置、センサー等々）も増加しており、様々な場面でノイズの被害装置となっています。

これらのノイズ発生源と被害装置の組合せは無数に存在し、エレクトロニクスの発展と共に、新たな形でノイズ障害が発生している状況です。

私どもは、世間ではまだノイズが一般的ではなかった 1960 年に自らノイズの被害者となり、メーカーとしての死活問題を克服する為にノイズ防止技術を開発したわけですが、昨今のノイズ障害も、弊社が創業時にノイズ対策に苦しんだ時の状況に似ている例が多く見られます。

それは、正常に動作・機能することが確認されたシステムが、場所を変えたり周囲に新たな設備が追加された際に突然不調をきたすことがあるという事例です。

この要因の一つは、ノイズに関する規格にあります。規格が存在しなかった時代に比べ、規格が整った現在は著しくノイズを出す機器は無くなり、ノイズによる影響を受けないようにノイズ耐量を高めた機器のみが販売されるようになりましたらから、より良い電磁環境となったことは間違

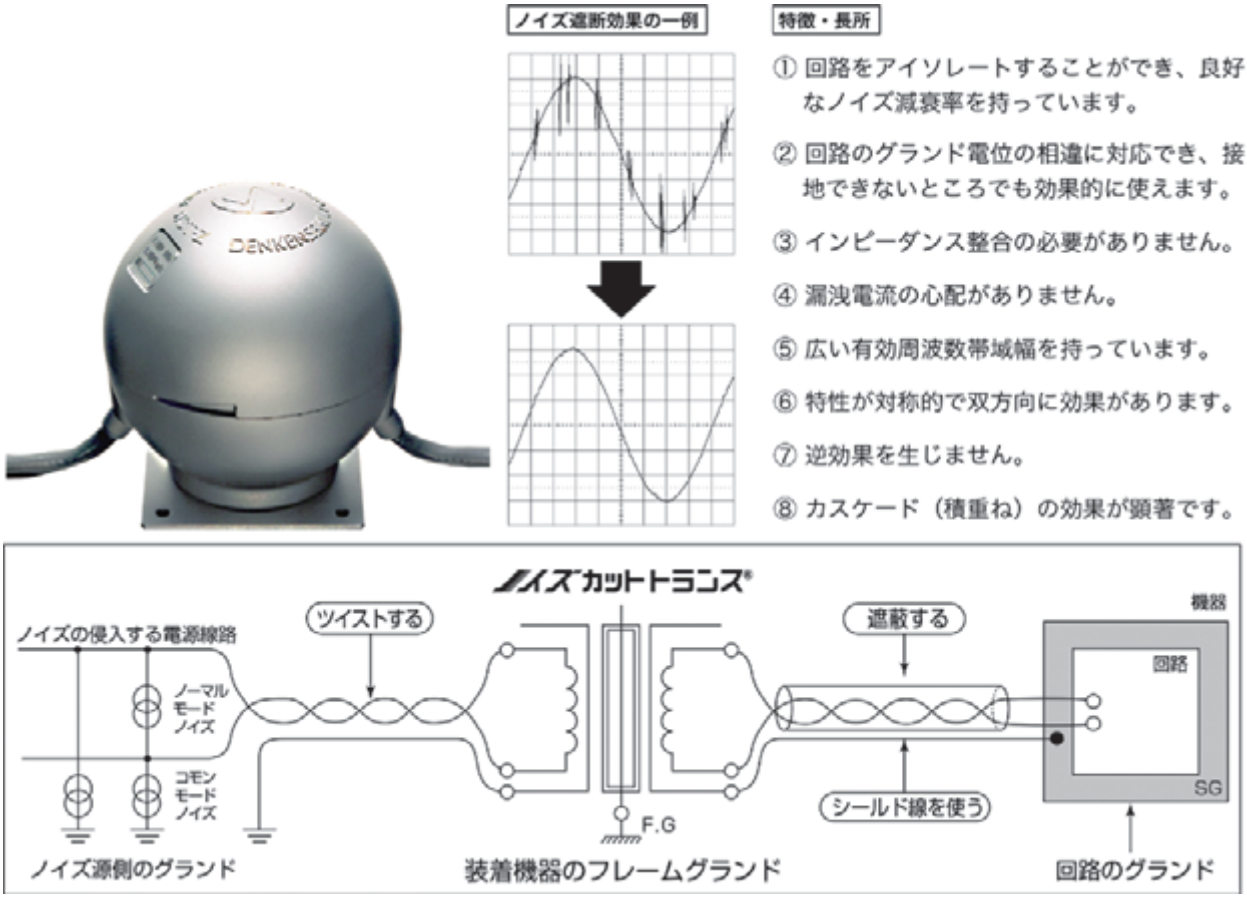


Fig. 9 《ノイズカットトランス®》の最高性能型 NCT-Z
弊社が 1960 年以来積み上げてきたノイズ防止技術をもとに、理論に最大限忠実に従い製品化。
（納入先：東京大学、名古屋大学等）

いありません。しかし、規格試験は再現性が求められるため、画一的な条件で試験を行います。具体的にはインピーダンス一定の環境で試験を行うのですが、これは、先のフォトマル用電源装置の例で言えば、弊社工場ではうまく行っても、核研に持ち込むと上手く行かなかったことと同じ構造です。つまり、アブソーバーやラインフィルターで規格をクリアできたからと言って、実使用でノイズに困らない保証はないということです。

電路をアイソレートしない方式のノイズ防止素子は、原理上、電源インピーダンスや周辺の設備機器の影響をどうしても受けてしまいます。このことに苦しんだ経験を持つ私どもだからこそ強く申し上げたいのは、様々な電磁環境下において効果を発揮しなければならない電源ラインのノイズ防止素子として、磁気結合を用いてアイソレートする方式が最も確実な方法であるということです。

3.3 益々必要性が高まるノイズ障害防止技術

今後も世界の科学技術はエレクトロニクス技術と共に発展することが期待されるものの、同時に光と影の関係にありますノイズ障害も、今までにない形で出現してくることが予想されます。

弊社はこれからもこのような外乱と対峙しながら、科学技術の健全な発展に微力ながら寄与すべく、新たな創出と劣悪な電磁環境下で真に役立つ実践的なものづくりを日本的な五感品質を以って研鑽してまいる所存です。

Fig. 10 《ノイズカット AVR™》の高精度タイプ PMN 型
ノイズ防止に加え、電圧安定精度± 0.1％、良好な正弦波の供給など、安定化電源として優れた特長を有す。
厳しい電磁環境下にあっても、精密測定器等にクリーンな電力を供給することができる。
（納入先：SPring-8 、J-PARC 等）

4. おわりに

高エネルギー加速器研究機構の外構に「宇宙、物質、生命の謎を解く」とありました。まさに真理の探究という命題を担っている先端科学技術には、人類の未来を開拓していくというロマンがあります。私どもは、このような分野の一助を担わせていただけることが無上の喜びでございます。

この度賜りました栄誉を、今後の糧にしてまいることをお誓いいたし、改めまして心より御礼申し上げます。

科学新聞記事

学　新　聞　2018年（平成30年）2月23日（金曜日）　第3668号　（2）

高エネルギー加速器科学研究奨励会

小柴賞・諏訪賞・熊谷賞 決定

高エネルギー加速器科学研究奨励会は、平成29年度の小柴賞、諏訪賞、熊谷賞の受賞者を決定。2月13日に授与式が行われた。

加速器や加速器を利用した研究で、特に優れた業績をおさめた研究者、技術者を顕彰し、加速器科学の発展に貢献することが目的。受賞者には賞金（各賞30万円）と表彰盾が贈られる。

小柴賞は、素粒子研究のための粒子検出装置の開発研究で、独創性に優れ国際的にも評価が高い業績をあげた50歳以下の研究者・技術者が対象。『SOI技術を用いた広ダイナミック・レンジX線イメージセンサの開発』で理化学研究所の初井宇記氏が、『高集積陽電子検出器システムKalliopeの開発と実用化』で高エネルギー加速器研究機構（KEK）の小嶋健児氏が受賞した。

初井氏は、先端技術であるSOI（シリコン・オン・インシュレータ）を用いて、従来のX線検出器よりもはるかに広いダイナミックレンジを持つX線イメージセンサの開発に成功した。これは超高輝度XFEL加速器・SACLAの実験用に開発され、カメラシステムとしても完成している。現在、SPring8やKEK－PFなどで様々な実験での利用が開始されている。

小嶋氏は、J－PARC（大強度陽子加速器施設）のMLFにおける大強度のミューオンビーム実験のための超高計数率崩壊陽電子計測システム・Kalliopeを開発した。プラスチックシンチレータとPPD、ASICとFPGAによる高密度信号処理ボードを一体型モジュールに収めることで、従来にない多チャンネル化と高計数率を実現した。このシステムは優れた拡張性・汎用性を持ち、理研や阪大の実験での利用を開始、あるいは実施予定だ。

各賞の受賞者（前列で表彰盾などを持つ5人）と関係者

諏訪賞は、加速器科学の発展上、長期にわたる貢献、特に顕著な業績があったと認められる研究者・技術者・研究グループが対象。『SOI技術を使った革新的ピクセルセンサの実現』でKEKの新井康夫氏、倉知郁生氏が受賞した。両者は、SOI技術を導入したこれまでにない高精細、高機能、高検出効率を持ったシリコンピクセルセンサを開発した。これは、センサと信号処理回路全体が一連の半導体プロセスだけで一体のチップ（モノリシックチップ）として製造できる。また、コンソーシアムを立ち上げ、潜在的なユーザーの掘り起こしも行っている。

熊谷賞は、研究開発、施設建設など長年の活動を通じて、加速器や加速器装置への顕著な貢献が認められる企業が対象。『ノイズカットトランスの発明、及び各種安定化電源の開発等、多年に亘る加速器科学への貢献』で電研精機研究所の矢ヶ崎文昭氏が受賞した。同社が開発・製造した、ノイズ障害防止を目的とした障害波遮断変圧器（ノイズカットトランス）と各種安定化電源は、国内の多くの加速器施設で使われており、加速器の性能向上と安定運転に大きく貢献した。

なお、今回は加速器、加速器利用に関する実験装置の研究で国際的にも評価が高い業績をあげた研究者が対象の西川賞に該当者はなかった。

公益財団法人　高エネルギー加速器科学研究奨励会
奨励賞候補者募集要綱
（平成 30 年度）

1. 趣　旨

加速器ならびに加速器利用に関る研究において、特に優れた業績をおさめた研究者・技術者に次の 4 賞で構成される奨励賞を授与し、もって加速器科学の発展に資することを目的とする。

2. 各賞の応募条件

西川賞　：　加速器ならびに加速器利用に関る実験装置の研究において、独創性に優れ、かつ論文発表され、国際的にも評価の高い業績をあげた、原則として 50 才以下（応募締切時）の単数または複数の研究者・技術者

小柴賞　：　素粒子研究のための粒子検出装置の開発研究において、独創性に優れ、国際的にも評価の高い業績を上げた、原則として 50 才以下（応募締切時）の単数または複数の研究者・技術者

諏訪賞　：　加速器科学の発展上、長期にわたる貢献など特に顕著な業績があったと認められる研究者・技術者・研究グループ

熊谷賞　：　研究開発、施設建設など長年の活動を通じて、加速器や加速器装置への顕著な貢献が認められる企業の加速器関係者

3. 表彰件数　4 賞合わせて 5 件以内

4. 賞の内容　賞金（各賞 30 万円）と表彰盾（各課題毎）を授与する

5. 選考方法　推薦のあった者について公益財団法人　高エネルギー加速器科学研究奨励会選考委員会で選考し、理事会において決定する。

6. 選　考　　平成 30 年 11 月上旬

7. 提出書類　(1) 推薦書（当公益財団法人のホームページに掲載の様式による）
(2) 選考資料　研究業績に関する発表論文（3 編以内）のコピー（各 2 部）

8. 受付期間　平成 30 年 6 月 1 日（金）～平成 30 年 10 月 25 日（木）

9. 書類の提出ならびに問合せ先

公益財団法人　高エネルギー加速器科学研究奨励会事務局
〒 305-0801　茨城県つくば市大穂 1-1　高エネルギー加速器研究機構内
TEL・FAX　：　029-879-0471
E メール　：　info@heas.jp　　ホームページ　：　http://www.heas.jp/

受付番号	
受付年月日	平成　年　月　日

公益財団法人　高エネルギー加速器科学研究奨励会

奨励賞候補者推薦書

候　補　者	氏名（ふりがな）	所属・職
研　究　課　題　名	（和文）	
	（英文）	
賞　の　種　類（*）	□　西川賞　□　小柴賞　□　諏訪賞　□　熊谷賞	
推　薦　要　旨		

平成30年度　公益財団法人　高エネルギー加速器科学研究奨励会　奨励賞候補者として、上記の者を推薦します。

平成　年　月　日

公益財団法人　高エネルギー加速器科学研究奨励会　選考委員長　殿

所属機関名

推薦者名　　印

（＊）授与する賞の種類については応募内容に応じて選考委員会が変更する場合がある。

候 補 者 略 歴	生年月日（西暦）　　年　　月　　日

研究業績及び推薦理由

平成 30 年度（2018 年度）事業計画書

自　平成 30 年（2018 年）4 月　1 日
至　平成 31 年（2019 年）3 月 31 日

公益財団法人　高エネルギー加速器科学研究奨励会は、高エネルギー加速器科学及び関連技術の研究を助成し、加速器科学の振興を図り、もつて我が国と海外との学術研究の推進を図ることを目的として次の事業を行う。

1. 研究に対する助成事業

（1）助成対象

高エネルギー加速器科学及びその関連技術に関し、優れた業績を有する国内及び海外の研究者・技術者に対する研究助成を行う。

①加速器の原理・物理・技術に関する研究
②加速器を用いた研究のための測定技術や装置の開発研究
③高エネルギー加速器を用いた研究
④我が国及び海外の加速器科学の振興のために特に必要と思われる研究
⑤上記研究に必要となる国内旅費

（2）助成件数……5 件程度

（3）選定方法

選考委員会において申請書の審査を行い決定する。

（4）報告の義務

助成を受けた者は研究成果の報告書を提出する。

（5）募集期間

平成 30 年（2018 年）4 月～ 12 月末日

2. 国際交流に対する助成事業

（1）助成対象

①高エネルギー加速器科学及びその関連技術に関し、優れた業績を有する国内の研究者及び技術者を海外に派遣する場合に助成する。
②高エネルギー加速器科学及びその関連技術に関し、優れた業績を有する海外の研究者及び技術者を招聘する場合に助成する。

（2）助成件数……5 件程度

（3）選定方法

選考委員会において申請書の審査を行い決定する。

（4）報告の義務

助成を受けた者は研究成果の報告書を提出する。

（5）募集期間

平成 30 年（2018 年）4 月～ 12 月末日

3. 国際会議・国際研究集会等に対する助成事業

（1）助成対象

国内において開催される高エネルギー加速器科学及びその関連技術に関する国際会議・国際研究集会等で高エネルギー加速器科学研究機関が主催する場合に助成する。

上記会議等に必要となる国内旅費及び機器購入費等の費用

（2）助成件数……5 件程度

（3）選定方法

選考委員会において申請書の審査を行い決定する。

（4）報告の義務

助成を受けた者は研究成果の報告書を提出する。

（5）募集期間

平成 30 年（2018 年）4 月～ 12 月末日

4. 研修会等の開催事業

（1）高エネルギー加速器セミナー（OHO' 2018）の開催

（高エネルギー加速器研究機構及び総合研究大学院大学との共催）

・開 催 テ ー マ：J-PARC 加速器（仮）
・開 催 日（予定）：平成 30 年 9 月初旬
・会　　場（予定）：高エネルギー加速器研究機構　3 号館セミナーホール
・参 加 費（予定）：賛助会員、大学生・大学院生……無料
（テキスト代）　　研究機関職員　2,000 円、一般企業職員　5,000 円
・募集人員（予定）：80 人
・募集期間（予定）：平成 30 年（2018 年）6 月末日～ 9 月上旬

（2）講演会の開催（主催）

・開 催 日（予定）：平成 30 年 10 月
・会　　場（予定）：アルカデイア市ヶ谷（東京）
・参 加 費　　：賛助会員は無料、他の参加者は資料代
・募集人員（予定）：50 人
・募集期間（予定）：平成 30 年（2018 年）7 月末日～開催前日

（3）高エネルギー加速器科学インターンシップへの助成

高エネルギー加速器研究機構は、幾多の優れた学術的成果を生み出し、今日では加速器科学における世界の研究センターの一つとなっている。

この高い研究レベルと研究への意欲・情熱を維持し、更に強化することが重要で、継続的な人材の育成を図るため、大学の 3・4 年生及び大学院修士課程の学生を対象とした「加速器インターンシップ制度」が必要となる。

この制度では、高エネルギー加速器研究機構のつくばキャンパスと東海キャンパスで進行している加速器の開発や運転に大学生（大学院生も含む）を一定期間受け入れて、その研究計画に参加させる。

この大学生（大学院生も含む）を受け入れるための財政支援を行う。

(4) レクチャー＆コンサート「科学と音楽の饗宴」への助成

「科学と音楽の饗宴」は、地域の文化活動の一環として、つくば市、高エネルギー加速器研究機構が主催しする講演と音楽のコラボレーション形式のイベントである。

科学に親しみながらバランスの取れた頭脳の能力向上を目指す企画として平成 17 年より毎年開催されている。

・開 催 日（予定）：平成 30 年 11 月
・会　　場（予定）：つくば市ノバホール
・参 加 費　　：無料
・来場者数　　：約 800 人

5. 研究者及び研究グループに対する顕彰事業

(1) 奨励賞の名称・概要

①西川賞　高エネルギー加速器ならびに加速器利用に関する実験装置の研究において、独創性に優れ、かつ論文発表され、国際的にも評価の高い業績をあげた、原則として 50 才以下（応募締切時）の単数または複数の研究者及び技術者

②小柴賞　素粒子研究のための粒子検出装置の開発研究において、独創性に優れ、国際的にも評価の高い業績を上げた、原則として 50 才以下（応募締切時）の単数又は複数の研究者及び技術者

③諏訪賞　高エネルギー加速器科学の発展上、長期にわたり顕著な寄与があつたと認められる研究者及び技術者

④熊谷賞　開発研究、施設建設など長年の活動を通して、高エネルギー加速器や加速器装置への顕著な貢献が認められる企業の加速器関係者

(2) 奨励賞の内容

賞金は各賞 30 万円とする

表彰盾は課題毎に授与する

(3) 表彰件数……各賞合わせて 5 件程度

(4) 選定方法

選考委員会において各賞受賞対象の審査を行い、理事会において決定する。

(5) 募集期間

平成 30 年（2018 年）4 月～ 10 月上旬

(6) 報告の義務

受賞者は受賞課題に対する研究成果の報告書を提出する。

6. 加速器科学に関する知識の普及・啓発事業

一般社会に対し、高エネルギー加速器科学に関する知識の普及・啓発活動を行う。

（一般公開・奨励会ホームページ・奨励会パンフレット・奨励会情報誌（FAS だより）等による PR を行う）

7. 出版物の編集及び刊行事業

高エネルギー加速器科学及び関連技術の研究成果を加速器科学の振興の為、我が国の研究推進を図ることを目的として出版物を発行する。

① FAS だより（奨励会情報誌）……賛助会員等に配布・130 部……年 2 回発行

②高エネルギー加速器セミナーテキスト……賛助会員・セミナー参加者に配布・70 部
……年 1 回発行

③ HIGH・ENERGY・NEWS ……賛助会員等に配布・75 部 ……年 4 回発行

8. その他、この法人の目的を達成するために必要な事業を行う。

平成 30 年度（2018 年度）収支予算書（損益計算書）

自：平成 30 年（2018 年）4 月 1 日　至：平成 31 年（2019 年）3 月 31 日

（単位：円）

科　　目		平成 30 年度予算（A）	平成 29 年度予算（B）	増　減（C=A-B）
Ⅰ．一般正味財産増減の部				
1．経常増減の部				
（1）経常収益				
基本財産運用益	基本財産受取利息	2,186,000	1,294,000	892,000
特定財産運用益	特定財産受取利息	51,000	3,000	48,000
受取会費	受取会費	4,950,000	5,050,000	△ 100,000
事業収益	研修会等事業益	170,000	103,000	67,000
受取寄附金	寄附金等	0	0	0
雑収益	預金受取利息	1,000	1,000	0
経常収益計		7,358,000	6,451,000	907,000
（2）経常費用				
①事業費	研究助成費	500,000	500,000	0
	国際交流助成費	500,000	500,000	0
	国際会議助成費	500,000	500,000	0
	その他の助成日	0	200,000	△ 200,000
	褒　賞　費	1,500,000	1,234,000	266,000
	研修会等開催費	793,000	350,000	443,000
	出版物頒布費	205,000	200,000	5,000
	印刷製本費	0	0	0
	諸謝金	0	0	0
	給料手当	500,000	600,000	△ 100,000
	旅費交通費	322,000	120,000	202,000
	通信運搬費	47,000	50,000	△ 3,000
	消耗品費	0	0	0
	賃借料	108,000	117,000	△ 9,000
	光熱水料費	22,000	24,000	△ 2,000
	雑費	32,000	10,000	22,000
事業費合計		5,029,000	4,405,000	624,000
②管理費				
	給料手当	2,333,000	2,308,000	25,000
	会議費	48,000	100,000	△ 52,000
	旅費交通費	262,000	200,000	62,000
	通信運搬費	61,000	30,000	31,000
	什器備品費	12,000	10,000	2,000

科　　目		平成 30 年度予算（A）	平成 29 年度予算（B）	増　減（C=A-B）
	消耗品費	126,000	30,000	96,000
	印刷製本費	0	0	0
	賃借料	102,000	117,000	△ 15,000
	諸謝金	50,000	50,000	0
	光熱水料費	22,000	25,000	△ 3,000
	雑費	16,000	10,000	6,000
管理費合計		3,032,000	2,880,000	152,000
経常費用計		8,061,000	7,285,000	776,000
当期経常増減額		△ 703,000	△ 834,000	131,000
経常外増減の部		0	0	0
(1) 経常外収益		0	0	0
有価証券売却益	有価証券売却益	0	0	0
基本財産評価益	基本公社債評価益	0	0	0
特定資産評価益	特定公社債評価益	0	0	0
経常外収益計		0	0	0
(2) 経常外費用		0	0	0
有価証券売却損	有価証券売却損	0	0	0
基本財産評価損	基本公社債評価損	0	0	0
特定資産評価損	特定公社債評価損	0	0	0
経常外費用計		0	0	0
当期経常外増減額		0	0	0
当期一般正味財産増減額		△ 703,000	△ 834,000	131,000
一般正味財産期首残高		114,901,226	115,735,226	△ 834,000
一般正味財産期末残高		114,198,226	114,901,226	△ 703,000
Ⅱ．正味財産期末残高		114,198,226	114,901,226	△ 703,000

（公）高エネルギー加速器科学研究奨励会賛助会員一覧

平成 30 年 4 月 2 日現在

	会員名		会員名
1	（株）IDX	31	日本高周波（株）
2	S.P. エンジニアリング（株）	32	日本電磁工業（株）
3	エーザイ（株）	33	（株）野村鍍金
4	（株）大阪真空機器製作所	34	VAT（株）
5	川崎設備工業（株）	35	浜松ホトニクス（株）
6	（株）関電工	36	日新パルス電子（株）
7	金属技研（株）	37	日立金属（株）
8	工藤電機（株）	38	（株）日立製作所
9	（株）ケーバック	39	富士通（株）
10	小池酸素工業（株）	40	武州ガス（株）
11	神津精機（株）	41	（有）双葉工業
12	新日鐵住金（株）	42	（株）マイテック
13	秀和電気（株）	43	（株）前川製作所
14	セイコー・イージーアンドジー（株）	44	三菱重工メカトロシステムズ（株）
15	太陽計測（株）	45	三菱電機（株）
16	大陽日酸（株）	46	三菱電機システムサービス（株）
17	（株）多摩川電子	47	（株）ジェック東理社
18	ツジ電子（株）		
19	（株）電研精機研究所		
20	東京ニュークリアサービス（株）		
21	（株）東芝 電力システム社		
22	東芝電子管デバイス（株）		
23	コカ・コーライーストジャパン（株）		
24	（株）トヤマ		
25	豊田通商（株）		
26	長瀬ランダウア（株）		
27	ニチコン（株）		
28	ニチコン草津（株）		
29	（株）日本アクシス		
30	日本アドバンストテクノロジー（株）		

評議員・役員等一覧

平成 30 年 4 月 2 日現在

評議員

氏　　名	所　　属
長島（ながしま）　順清（よりきよ）	大阪大学　名誉教授
矢野（やの）　安重（やすしげ）	仁科記念財団　常務理事
横溝（よこみぞ）　英明（ひであき）	一般財団法人総合科学研究機構理事長　兼　中性子科学センター長
大野（おおの）　英雄（ひでお）	（財）高輝度光科学研究センター　研究顧問
袴田（はかまだ）　敏一（としかず）	浜松ホトニクス株式会社　顧問
佐藤（さとう）　潔和（きよかず）	東芝エネルギーシステム株式会社　京浜事業所　技監

任期　平成 26 年度の最終のものに関する定時評議員会の終結時（平成 27 年 5 月 19 日）から平成 30 年度の最終のものに関する定時評議員会の終結の時（平成 31 年 5 月下旬）までとする。

役員（理事）

役　職	氏　　名	所　　属
代表理事	髙﨑（たかさき）　史彦（ふみひこ）	高エネルギー加速器研究機構　先端加速器推進部　研究員
業務執行理事	神谷（かみや）　幸秀（ゆきひで）	高エネルギー加速器研究機構　理事
理　事	浅野（あさの）　克彦（かつひこ）	株式会社日立製作所　日立事業所　主管技師長
理　事	熊谷（くまがや）　教孝（のりたか）	国立研究開発法人科学技術振興機構未来社会創造事業 プログラムマネージャー
理　事	上坂（うえさか）　充（みつる）	高エネルギー加速器研究機構　研究員

任期　平成 28 年度の最終のものに関する定時評議員会の終結時（平成 29 年 5 月 12 日）から平成 30 年度の最終のものに関する定時評議員会の終結の時（平成 31 年 5 月下旬）までとする。

役員（監事）

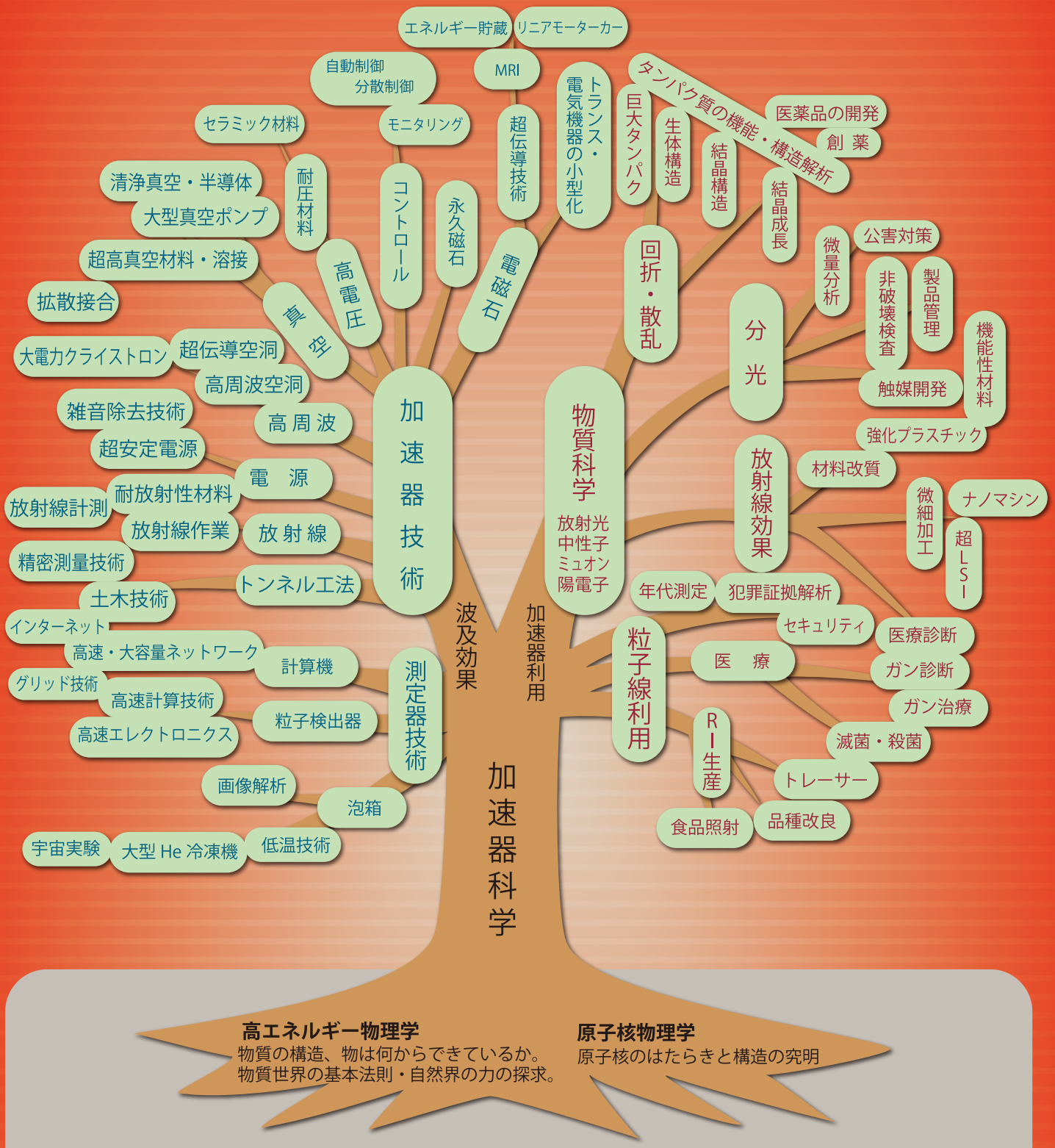
役　職	氏　　名	所　　属
監　事	木村（きむら）　嘉孝（よしたか）	高エネルギー加速器研究機構　顧問

任期　平成 26 年度の最終のものに関する定時評議員会の終結時（平成 27 年 5 月 19 日）から平成 30 年度の最終のものに関する定時評議員会の終結の時（平成 31 年 5 月下旬）までとする。

選考委員会委員

氏　　名	所　　属
山口（やまぐち）　誠哉（せいや）	高エネルギー加速器研究機構　加速器研究施設　施設長
上垣外（かみがいと）　修一（おさむ）	理化学研究所　仁科加速器研究センター　加速器基盤研究部　部長
長谷川（はせがわ）　和男（かずお）	国立研究機関法人　日本原子力研究開発機構 J-PARC センター加速器デビジョン　デビジョン長
幅（はば）　淳二（じゅんじ）	高エネルギー加速器研究機構　素粒子原子核研究所　教授
山中（やまなか）　卓（たく）	大阪大学　大学院理学研究科　教授
中家（なかや）　剛（つよし）	京都大学　大学院理学研究科　教授
永江（ながえ）　知文（ともふみ）	京都大学　大学院理学研究科　教授
木下（きのした）　豊彦（とよひこ）	公益財団法人　高輝度光科学研究センター利用推進部　部長

任期　平成 29 年 4 月 1 日から平成 31 年 3 月 31 までとする。



発 行　公益財団法人
高エネルギー加速器科学研究奨励会

〒305-0801
つくば市大穂 1-1 高エネルギー加速器研究機構内（職員会館 2F）
TEL・FAX：029-879-0471
E-mail：info@heas.jp
URL：http://www.heas.jp/