

話 題

核理研から電子光センター，50年の歩み

日出 富士雄*・濱 広幸*

50 Years from LNS to ELPH

Fujio HINODE* and Hiroyuki HAMA*

Abstract

Research Center for Electron Photon Science (ELPH) at Tohoku University had passed fifty years since the establishment of Laboratory of Nuclear Science (LNS) affiliated to the Graduate School of Science, the forerunner of the present center. LNS started in 1966 as a user's facility available to the researchers in Tohoku University. The pulsed electron beam from the 300 MeV LINAC, which was constructed in 1967, has been widely utilized for not only nuclear physics but also other research fields such as material science and nuclear chemistry. In also the same 1967, experiments with the pulsed neutron generated by the accelerator were started for the first time in the world. Since then a lot of pioneer works had been performed till the termination of the neutron facility in 1993. Furthermore, it was first demonstrated in the world to stretch the pulsed beam from LINAC by a pulse-stretcher ring in 1981. This ring had led some distinguished researches in nuclear physics and been succeeded to the 1.2 GeV stretcher-booster ring in 1995. After the reorganization from LNS in 2009, ELPH has conducted significant research and educational activities as a part of Joint Usage / Research Centers since FY 2011. In this article we would like to introduce the history for these 50 years up to the commemorating ceremony for the 50th anniversary of the establishment held on the last November, focusing on the vicissitudes of the electron accelerator complex and the roles played at that each time.

1. 核理研設立と 300 MeV LINAC の建設

東北大学電子光物理学研究センター（以下「電子光センター」）の前身である理学研究科附属原子核物理学研究施設（略称「核理研」）の初代施設長となる木村一治先生は理化学研究所で中性子研究に携わっていた方で¹⁾、太平洋戦争終戦間際に新型爆弾が投下された際には直後の広島や長崎へも調査に参加し、原子力爆弾であったことを明らかにした。木村教授が東北大学に着任した昭和25年当時は、既にアメリカやソ連で巨大加速器の建設が始まっており、Stanford 大学では昭和28年に600 MeVの電子線形加速器（Mark III）が完成間近であった²⁾。戦後の焼け野原の何もないところから小型の加速器を手作りで用意することから始めるような状況の中、昭和33年には関連部局とともに原子理工学委員会を設置し、「東北大学原子核理工学研究所設置計画案」を文部省に提

出している。電子線形加速器を用いた原子核研究は、当時はまだ緒についたばかりで、1961年（昭和36年）にHofstadter教授（Stanford 大学）が「線形加速器による高エネルギー電子散乱の研究と核子の構造に関する発見」によりノーベル物理学賞を受賞するなど、ようやく世界各地で原子核研究を中心とした100 MeV級の電子線形加速器の建設や計画が進められるようになっていた。このような中、東北大学では原子核を励起する電子非弾性散乱をも視野に入れた世界をリードする300 MeV LINACの計画を策定し、概算要求の提出を始めて3年目となる昭和38年に建設予算が認められることとなった。建設グループは、責任者の木村先生のもと、全学の支援で設置された電子ライナック研究施設の教官（助教授：鳥塚賀治・小島融三・梶山一典，助手：菅原真澄・小山田正幸・浦沢茂一）とシンクロトロン研究施設の庄田勝房助教授による体制であった。建設工期は昭和

* 東北大学電子光物理学研究センター Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University (E-mail: hinode@lns.tohoku.ac.jp, hama@lns.tohoku.ac.jp)

38年度より4ヵ年、加速器本体に建屋等を含めた総工費は13億6,800万円と多額に上ったため、関連研究機関へ与えた衝撃は大きく、結果として核物理コミュニティー内に軋轢を生む結果になってしまったとのことである³⁾。東北大学における線形加速器研究の歴史は古く、昭和25年頃には既に科学計測研究所の岡村俊彦先生がマグネトロンを用いた電子加速の研究を始めている。その後、鳥塚先生らが5 MeVの電子LINAC（ピーク電流150 mA）を昭和35年には完成させていた。しかし、いきなり300 MeVの実機を建設するには技術的飛躍が大きいとの判断のもと、先ず30 MeV試作機の建設が仙台市南部にあった富沢旧教養部の講義棟を改造した建物で始まった⁴⁾。テストベンチでの試作機組み立てが完了したのは昭和39年末のことである。図1の写真は富沢旧教養部の敷地で始まった建設工事の様子である。300 MeV LINACの設置される全長50 mを超える加速器本体室や大型分析装置のための二つの実験ホールなど合わせて床面積約4,200 m²にわたる大規模な工事であった。左奥には日本アイソトープ協会廃棄物東北貯蔵所（当時）の建物も見える。

昭和41年4月、東北大学の学内共同利用施設として核理研は正式に発足した。当初は電子ライナック研究部門のみの組織であったが、全学の流用定員と物理学教室の所属定員を含め、施設長の木村教授のもと助教授5名、助手4名の陣容であった。加速器本体室や実験室からなる実験棟は昭和41年10月に竣工し、300 MeV LINACをはじめとした実験装置はこの実験棟の地下に、クライストロンやモジュレータは地上に配置された。図2は建設間もない頃の300 MeV LINACである。低エネルギー大電流用（A部）の加速管8本と、その下流には高エネルギー加速用（B部）の加速管12本が設置されていて、これらのS-バンド加速管20本が1ユニットを4本として合計5本のクライストロンで駆動される構成となっている^{4,5)}。建設にあたっては、1964年に完成したばかりのSaskatchewan大学の140 MeV電子LINAC（Saskatchewan Accelerator Laboratory）を参考にしたと聞いている。

初期の主要な運転モードとして、RI製造用低エネルギー運転時は $E_0=20 \sim 75$ MeV、平均電

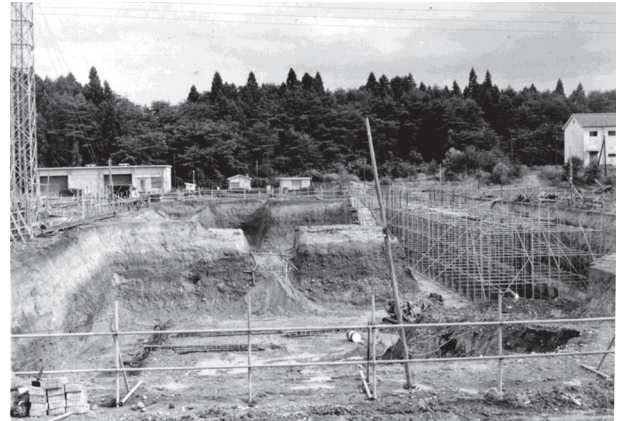


図1 富沢旧教養部敷地での建設工事

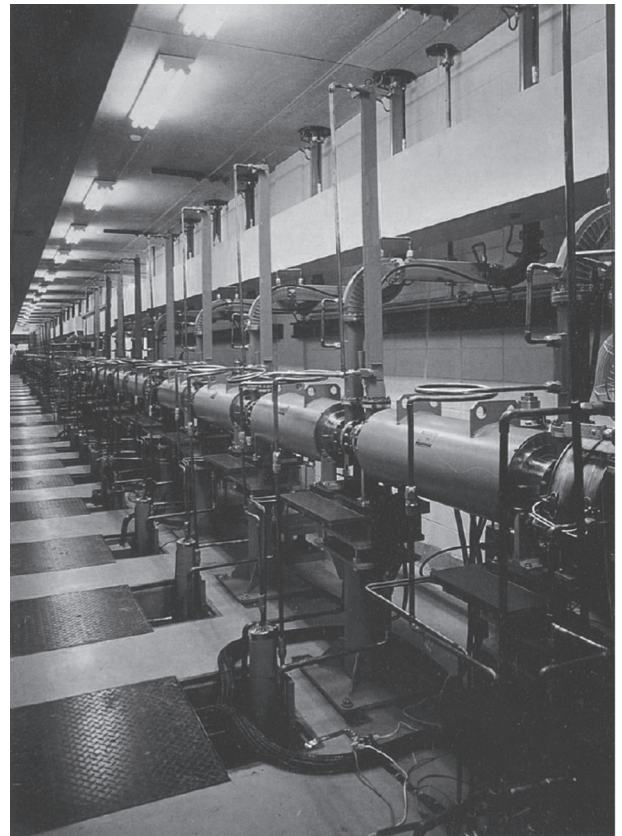


図2 300 MeV LINAC. 右手前側に電子銃とプリバンチャー、バンチャーが設置されており、その下流に1 m加速管8本からなるA部と、更に下流に2 m加速管12本からなるB部が接続されている

流 $I_0=70 \sim 150 \mu A$ で、中性子回折や電子散乱実験などB部も用いた高エネルギー運転時は $E_0 \sim 250$ MeV、ピーク電流 $I_p \sim 50$ mAであり、最大300 ppsでの高い繰り返し運転が可能となっている。

2. 施設の変遷と果たした役割

300 MeV LINAC は、昭和 42 年 5 月 24 日に電子銃に点火すると 2 時間後には予定のビーム加速に成功し、その翌日には既に電子散乱の実験が行われていたとのことである。実験に必要なスペクトロメータなどの大型装置も、LINAC と同時に完成されている点は特筆されるべきであろう⁶⁾。同年 10 月には試験的に第 1 回の共同利用が開始されているが、当初に提出された実験計画(25 課題)の要求日数は実施可能日数の 3 倍にも達し、最終的に物理学科の北垣敏男教授を委員長として組織された課題採択委員会によって 79 日の運転が採択されている⁷⁾。こうして開始された高強度電子線を用いた研究は、各分野で最先端を突き進むものとなった⁸⁾。昭和 51 年には、RF 窓からの浸水により加速管が水没するという致命的ともいえるトラブルを乗り越え、その後も学内にとどまることなく学外や海外の研究者まで広く電子ビームを供してきた。

2.1 300 MeV LINAC と核理学研究

原子核物理分野では、高分解能大型磁気スペクトロメータを用いた電子散乱の研究が主要テーマの一つとして精力的に進められた。特に原子核における四重極振動巨大共鳴の発見は、従来知られていた陽子-中性子集団の双極型振動以外にも多くの集団運動巨大共鳴モードの存在を示す画期的な成果であった⁹⁾。鳥塚教授はこの「原子核の巨大共鳴の研究」により、昭和 55 年に第 26 回仁科記念賞を受賞している。もう一つの主要研究課題として庄田助教授らを中心に進められたのが、制動放射ガンマ線を原子核に吸収させ、放出陽子を広領域磁気スペクトロメータにより測定する光核反応の研究である。核理研では、(e, p) 反応からの陽子スペクトルの測定において、中重核以上の光核反応でアイソバリックアナログ状態から放出される陽子の鋭いピークが世界で初めて見出された¹⁰⁾。その後も巨大共鳴のアイソスピン分離、スピン反転転移の研究等とテーマは多岐にわたり、大きな成果をあげた。更に光核反応の発展として、パイ中間子生成の閾値を超える電子線を用いて、(γ , π^+) 反応による原子核からの中間子生成という新たな領域も開拓した¹¹⁾。

2.2 パルス中性子源の完成

木村教授がかねてから興味を持っていた LINAC からのパルス電子線を鉛標的に照射することで発生したパルス中性子を用いる中性子回折実験は、早くも昭和 42 年の暮れには開始されていた。その後、巨大なコンクリートの遮蔽体で囲まれた ND トーチカと呼ばれる中性子源が昭和 46 年に完成すると、世界に先駆けた物性研究成果が次々と産み出され、後に高エネルギー物理学研究所やアルゴンヌ研究所、ラザフォード研究所等で建設された加速器による大強度パルス中性子源の原型ともなった。単結晶を用いた中性子回折においては、高い次数の反射強度の精密測定、逆格子空間内の強度分布の測定など、中性子回折現象の基礎研究に優れた手法であることを明らかにした。また試料に印加する外部電場とパルス中性子を同期させることで、構造変化している過渡現象の構造解析が世界に先駆けて行われている。木村先生をはじめ施設内外の諸先生方の尽力により、平成 5 年にその歴史的使命を終えて閉鎖されるまで、核理研中性子源はパルス中性子散乱に関する測定技術の確立に貢献するとともに多くの先駆的研究を成し遂げた¹²⁾。

2.3 核・放射化学, RI 利用分野

300 MeV LINAC の A 部からの高強度電子線を用いた核・放射化学分野の研究も学内共同利用の一角として早くから取り上げられていた。八木益男助教授や近藤健次郎助手らにより、高比放射能 RI の調製を目的とした大強度・強収斂電子ビーム照射装置が世界に先駆けて開発・設置され、その後の改良を経て昭和 51 年頃までには現在のようなシステムが完成した¹³⁾。これによって多数、多量試料に対して、試料中心軸へ電子線・制動放射線を同時に照射することが可能となり、気送管を用いた迅速な輸送システムなども導入され、多くの学内外の研究者により共同利用研究が活発に遂行されていった。代表的な研究テーマも生体への応用やホットアトム化学領域の研究、光量子放射化分析など広範囲にわたっている。共同利用に加えて、更に昨年 4 月からは新学術領域の取り組みとして、阪大核物理研究センターや理研仁科センター、東北大サイクロトロンとともに短寿命 RI 供給プラットフォーム事業も展開している¹⁴⁾。

2.4 パルスストレッチャーリング

1970年代から同時計数実験可能な連続電子ビームの重要性が認識され，世界各地で新しい電子加速器の建設が計画されていた。核理研では菅原真澄教授や玉江忠明助手らにより，LINACからのパルス電子線をリング内に一時的に蓄積してから徐々に取り出すことで，時間的に連続な電子ビームを得るパルスストレッチャー方式による実証用加速器（SSTR：Sendai Small Stretcher Ring）が世界で初めて建設され（図3），昭和56年12月にデューティーファクター80%，エネルギー幅0.2%で1 μ Aの連続電子ビームの取り出しに成功した¹⁵⁾。

SSTRは実証用加速器として様々な性能がテストされ，その成功は後にSaskatchewan, MIT/Bates, NIKHEFのパルスストレッチャーリング建設の後押しとなった。更にSSTRからの150 MeV連続電子ビームは，当時はほとんど行われていなかった（ $e, e'X$ ）同時計数測定に適用され，初めて弾性散乱輻射テール起源のバックグラウンドに邪魔されない巨大共鳴の研究が行われた¹⁶⁾。また100 MeV程度の単色ガンマ線（tagged photon）による実験も可能となり，（ γ, p ），（ γ, n ），（ γ, pn ）及び（ γ, pp ）測定を通じた，原子核内の2核子相関や中間子交換電流に関する研究も行われた。これら連続電子線による原子核研究は，

後の1.2 GeV STBリングを用いた実験へと引き継がれていった。

2.5 コヒーレント放射光の観測

電子バンチからのコヒーレント放射は，理論的には1940年代には指摘されていたが，核理研では東北大学科学計測研究所の池沢幹彦教授らのグループとともに，昭和63年に核理研のLINACを用いて世界で初めて，実験的にコヒーレント放射光を観測することに成功した¹⁷⁾。その後も，ミリ波からサブミリ波領域でのスペクトル計測や干渉性の実験，シールドによる放射抑制やマイクロバンチFELの研究などが行われてきた¹⁸⁻²⁰⁾。後述するように，現在は新たに専用の試験加速器（t-ACTS：test-Accelerator as a Coherent Terahertz Source）を建設し，100フェムト秒以下の超短バンチ電子ビームからのコヒーレント放射を用いたTHz光源の開発研究などを進めている。

2.6 1.2 GeV STBリングの建設

昭和63年頃になると次期加速器計画として放射光リングとの共用リング計画が提案されたが，平成6年には1.5 GeV放射光リングと1.2 GeV STBリングの二つのリングの計画として推進されるようになった。STBリングは，パルスストレッチャーとしての機能と放射光リングへの入射用ブースターとしての機能を併せ持つリングとされ

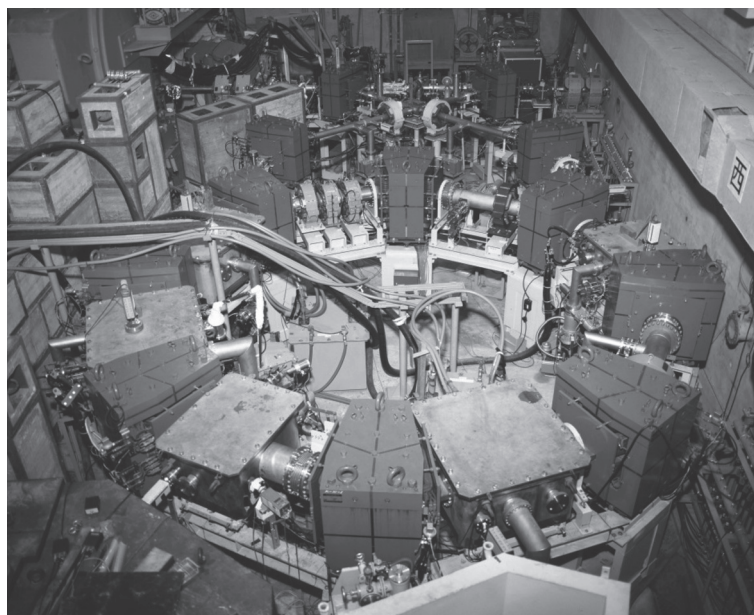


図3 パルスストレッチャーリング（SSTR）

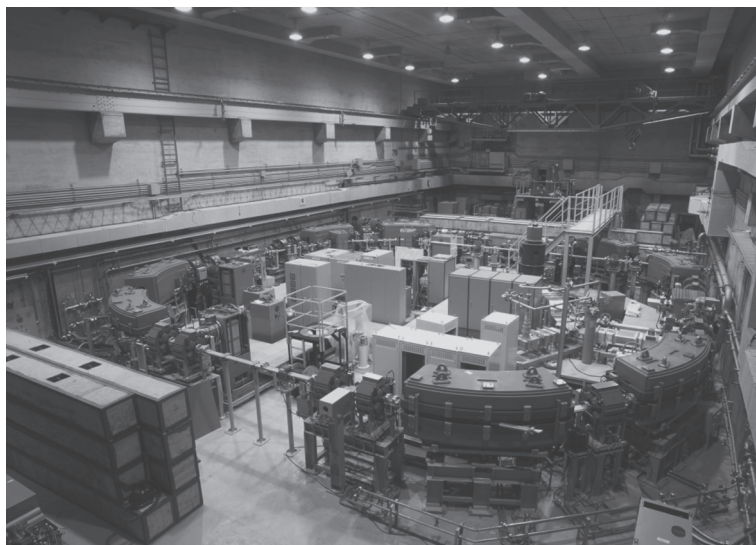


図4 1.2 GeV STB リング

ていた。その後、平成7年4月に当初計画から大幅に縮小されて、第二実験室内に配置可能な周長50 mのリングとしてSTBの予算が認められ、小山田正幸助教授を中心としたグループにより建設が進められた。STBリングは平成10年7月に施設検査が終了し、同年10月より共同利用実験を開始した(図4)。その後、平成14年には核内クォーク反応の研究を行うための実験室としてGeVガンマ実験棟が新たに建設された。その照射室には、現在、標識化GeVガンマ線ビームラインと電子・陽電子ビームラインが設置されており、GeVガンマ線ビームラインでは世界最高水準の分解能を誇る多重ガンマ線検出器群FORESTを用いたハドロン生成実験が行われている²¹⁾。一方、電子・陽電子ビームラインにおいても検出器開発などのテスト実験が大変活発に行われている。またSTBリングのある第二実験室においては、リングからのGeVガンマ線を用いた中性K中間子生成反応のための実験装置としてNeutral Kaon Spectrometer (NKS)が建設され、現在はサイクロトロンRIセンターの初代680サイクロトロンのヨークを改造したNKS2を用いて、理学研究科物理教室のグループがハイパー核関連の研究を行っている²²⁾。

3. 電子光センター改組と震災からの復興

電子光センターは、平成21年12月1日に清水肇センター長のもと理学研究科附属施設から新

たな独立部局として発足し、文科省から共同利用・共同研究拠点(電子光物理学研究拠点)としての認定を受け、平成23年4月より拠点活動を開始した。電子光センターに設置された研究部は、加速器・ビーム物理研究部、核物理研究部、光量子反応研究部の3部門で、「電子・光子ビーム」を共通のキーワードとする、それまで核理研が電子加速器を駆使して長年にわたり切り拓いてきた分野である。平成27年4月には更に民間企業の出資で凝縮系核反応研究部(共同研究部門)も設立された。

平成23年4月からの電子光物理学研究拠点の発達は、直前の3月11日に東日本を襲った観測史上最大とされる巨大地震により非常に厳しいものとなった。施設の多くの設備・機器が損傷を受けたが、とりわけ建設から45年を経た300 MeV LINACは、低エネルギー部のみを修復し、高エネルギー部は解体せざるを得ない事態に至った。被災設備の撤去・改修作業の現場の陣頭指揮には河合正之准教授があたったが、地下の加速器室から搬出したコンクリートシールドブロック(1~3トン)は約500個、総重量1,000トンにも上り、撤去した廃棄部品の仕分け作業も放射化物だけで2,000点を超える膨大な作業であった。震災後に大学が措置した復旧予算により、解体した300 MeV LINACの高エネルギー部に代わって、新たにリングのために入射専用の線形加速器(図5参照)を建設することができたが、予算の制限によ

り加速エネルギーは 90 MeV とかなり低いものとならざるを得なかった。しかし、これにより従来の大強度 LINAC とリングの同時運転が可能となり、運転時の制約を大きく改善することができた。更に STB リングについても、利用されなくなっていたパルスストレッチャーとしての機能は廃止してブースター・蓄積リング (BST リング) として改修することにし、周回エネルギーを 1.3 GeV に増強するとともに、色収差補正を可能にする 6 極磁場を重畳した 4 極磁石も導入するなど性能改善が図られている。

また、平成 22 年 3 月に光源加速器棟が竣工すると、そこに前述した 50 MeV の試験加速器 t-ACTS (図 6 参照) を建設した²³⁾。この加速器

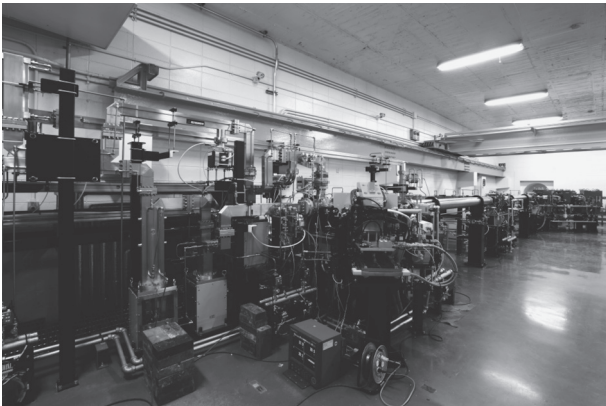


図 5 震災後に建設された入射専用 LINAC

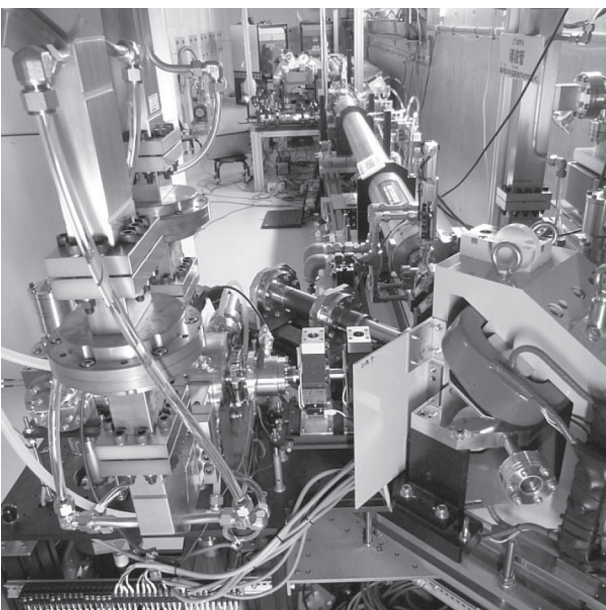


図 6 THz 光源用試験加速器 t-ACTS

はビーム動力学の研究や超短電子バンチ生成とこれによる THz 領域でのコヒーレント光源の開発などを目指したものであり、独自に考案した独立 2 空洞型熱陰極高周波電子銃 (ITC RF-gun) を用いた構成は、入射用 LINAC でもほぼ同様とした。現在は、ImPACT プログラム (「ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現」佐野雄二プログラムマネージャー)²⁴⁾ の一部として高エネルギー加速器研究機構の山本樹教授が開発しているマイクロアンジュレータの評価試験を実施している他、低屈折率のシリカエアロゲル薄膜から発生するチェレンコフ光を用いたビームモニターの開発研究なども進めている。

この他、長年にわたり要求されていた研究棟の改修作業も震災復旧と時を同じくして実施される運びとなり、125 名の収容が可能な三神峯ホールが新設されるなど、教育・研究環境も大いに改善された。

4. 設立 50 周年を迎えて

設立 50 周年を祝し、昨年 11 月に記念式典が挙行された。式典には多くの卒業生をはじめ関係機関の方々も含め、平日にもかかわらず 200 名を超す参加者に列席頂いた (図 7)。これまでに 122 名の修士と 54 名の博士を輩出してきたが、式典では卒業生でもある岩手県立大学の鈴木厚人学長に祝辞を、同じく東北大学名誉教授の笹尾眞實子先生から記念講演を頂いた。両氏とも、核理研開設間もない頃の大変充実した日々の思い出を語って頂き、実験結果が全て世界最先端のデータであったとの当時のエピソードは敬服の至りであ



図 7 設立 50 周年記念式典の様子

る。式典ではまた、京都大学名誉教授の野田章先生より、大学加速器施設の役割やその目指すものについてのご講演も頂き、大変有意義な講演会とすることができた。

50年の大きな節目に際し、改めてこれまでの歴史と伝統の重さに感慨を深くするとともに、当センターが国内有数の大学附置加速器施設であることの特徴を活かし、社会に貢献する優れた人材の育成と先端的科学の発展のため、これまで以上に取り組んでいかねばならないと決意を新たにしている次第である。最後に本稿を結ぶにあたり、紹介しきれなかった多くの諸先輩方の奮闘はもとより、関係する多くの方々に支えられて現在を迎えることができたことを、この場を借りて深く感謝するとともに、今後とも一層のご支援、ご協力をお願いするものである。

参考文献

- 1) 東北大学百年史 第5巻 部局史2, 第1編 第10章 附属原子核理学研究施設, p.465-484, 東北大学出版会, (2005).
- 2) M. Chodorow, E.L. Ginzton, W.W. Hansen, R.L. Kyhl, R.B. Neal, W.K.H. Panofsky and the staff, *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 26, No. 2, p.134, (1955).
- 3) 井上信, 「日本加速器外史 (その2)」 *加速器* Vol. 1, No. 3, p.255-263, (2004).
- 4) 鳥塚賀治, 小島融三, 浦沢茂一, 「東北大 300 MeV 電子リニアック」 *応用物理* Vol. 37, No. 8, p.690, (1968).
- 5) 三菱電機技報 Vol. 42, (1968).
- 6) M. Kimura, Y. Torizuka, K. Shoda, M. Sugawara, T. Saito, M. Oyamada, K. Nakahara, K. Itoh, K. Sugiyama, M. Gotoh, K. Miyashita, K. Kurahashi, *Nucl. Instrum. & Meth.* 95, p.404, (1971).
- 7) 木村一治, *核理研研究報告* Vol. 1, No. 1, (1968).
- 8) 鳥塚賀治, 「ライナック 10 年の研究成果」 *日本物理学会誌* Vol.33, No.10, p.801-811, (1978).
- 9) M. Nagao, Y. Torizuka, *Phys. Rev. Lett.* 30, p.1068, (1973).
- 10) K. Shoda, M. Sugawara, T. Saito, H. Miyase, *Phys. Lett. B* 28, p.30, (1968).
- 11) K. Shoda, H. Ohashi, K. Nakahara, *Phys. Rev. Lett.* 39, p.1131, (1977).
- 12) 石川義和, 渡辺昇, 新村信雄, 鈴木謙爾, 「東北大核理研電子リニアックによる中性子散乱研究」 *核理研研究報告 増刊号* Vol. 10, 創立 10 周年記念講演集, p.60, (1977).
- 13) M. Yagi, K. Kondo, *Journal of Radioanalytical Chemistry*, 36, p.247, (1977).
- 14) <https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~ripf/>
- 15) T. Tamae, M. Sugawara, O. Konno, T. Sasanuma, T. Tanaka, M. Muto, K. Yoshida, M. Hirooka, Y. Shibazaki, K. Yamada, T. Terasawa, M. Urasawa, T. Ichinohe, S. Takahashi, H. Miyase, Y. Kawazoe, S. Yamamoto, Y. Torizuka, *IEEE Trans. on Nucl., Sci.* 30, p.3235, (1983).
- 16) T. Tamae, H. Kawahara, A. Tanaka, M. Nomura, K. Namai, M. Sugawara, Y. Kawazoe, H. Tsubota, H. Miyase, *Phys. Rev. Lett.* 59, p.2919, (1987).
- 17) T. Nakazato, M. Oyamada, N. Niimura, S. Urasawa, O. Konno, A. Kagaya, R. Kato, T. Kamiyama, Y. Torizuka, T. Nanba, Y. Kondo, Y. Shibata, K. Ishi, T. Ohsaka, M. Ikezawa, *Phys. Rev. Lett.* 63, p.1245, (1989).
- 18) Y. Shibata, K. Ishi, T. Ohsaka, H. Mishiro, T. Takahashi, M. Ikezawa, Y. Kondo, T. Nakazato, M. Oyamada, N. Niimura, S. Urasawa, R. Kato, Y. Torizuka, *Nucl. Instrum. & Meth. A* 301, p.161, (1991).
- 19) R. Kato, T. Nakazato, M. Oyamada, S. Urasawa, T. Yamakawa, M. Yoshioka, M. Ikezawa, K. Ishi, T. Kanai, Y. Shibata, T. Takahashi, *Phys. Rev. E* 57, p.3454, (1998).
- 20) S. Sasaki, Y. Shibata, K. Ishi, T. Ohsaka, Y. Kondo, F. Hinode, T. Matsuyama, M. Oyamada, *Nucl. Instrum. & Meth. A* 483, p.209, (2002).
- 21) T. Ishikawa, H. Fujimura, H. Fukasawa, R. Hashimoto, T. Ishida, S. Kaida, J. Kasagi, A. Kawano, S. Kuwasaki, K. Maeda, F. Miyahara, K. Mochizuki, T. Nakabayashi, A. Nakamura, K. Nawa, S. Ogushi, Y. Okada, K. Okamura, Y. Onodera, Y. Saito, Y. Sakamoto, M. Sato, H. Shimizu, H. Sugai, K. Suzuki, S. Takahashi, Y. Tsuchikawa, H. Yamazaki, H. Yonemura, *Nucl. Instrum. & Meth. A* 832, p.108, (2016).
- 22) K. Futatsukawa, B. Beckford, P. Bydžzovsky, T. Fujibayashi, Y. Fujii, O. Hashimoto, Y.C. Han, K. Hirose, K. Hosomi, A. Iguchi, T. Ishikawa, H. Kanda, M. Kaneta, D. Kawama, T. Kawasaki, S. Kiyokawa, T. Koike, O. Konno, K. Maeda, N. Maruyama, K. Miwa, Y. Miyagi, S.N. Nakamura, A. Sasaki, K. Shirotori, M. Sotona, K. Suzuki, T. Tamae, H. Tamura, N. Terada, K. Tsukada, H. Yamazaki, *EPJ Web of Conferences* 20, 02005, (2012).
- 23) H. Hama, M. Kawai, S. Kashiwagi, F. Hinode, F. Miyahara, K. Nanbu, T. Muto, Y. Tanaka, X. Li, N.-Y. Huang, *Energy Procedia* 9, p.391, (2011).
- 24) <http://www.jst.go.jp/impact/sano/index.html>