

特集 (日本の加速器の歴史)

光源加速器の誕生・・・SOR-RING 建設のいきさつ

佐々木 泰三*

The Initiative toward a Dedicated Synchrotron Light Source
A Story of Constructing the SOR-RING

Taizo SASAKI*

Abstract

Advent of electron synchrotrons created tremendous opportunities in photon associated sciences. However, the initial utilization of light depended on the accelerators built for other purposes, namely, the high energy physics, so that the access was limited mostly in parasitic modes.

Japanese synchrotron radiation users had thus undertaken building an electron storage ring as a dedicated light source as early as 1965, and the construction started in 1970. The first successful storage was accomplished in late 1974, thus the machine "SOR-RING" had become the first purposely built electron accelerator for synchrotron radiation research. It was also unique in that the machine was built mainly by radiation users. The motivations, the processes of construction, and achievements are described.

1. 光源としての電子加速器

電子を加速すれば光が発生する。高速で走る電子を磁場で円軌道に拘束し、高周波で繰り返し加速する電子シンクロトロン（ES）のアイデアは第二次世界大戦中に米ソ両国で出現したが、つぎ込んだエネルギーの大半が光になって失われるという欠陥で壁に突き当たった。その逃げ道が一つは電子線形加速器、もう一つが陽子シンクロトロンであった。大型の電子シンクロトロンは1960年代の DESY を最後に絶滅した。

電子で原子核を壊して中間子を叩き出そうという高エネルギー実験にとってはこの事実はマイナスだ。しかし光の利用という立場に立つとこの事実は注目に値する。円軌道を廻る電子の発光は連続スペクトルで、特に人工光源が殆ど存在しない極紫外から X 線全域で白色光を出すというのが凄い。白色光というのは一度に全ての波長の光が出るという利点よりも、むしろ使う波長を自由に選択できる利益が絶大である。それも光が弱ければ大した価値は無いが、この光は波長 0.1 nm の X 線と比較すると医学診断用に病院などで使われているものに比べて 12~16 桁も強いというのが現状である（平均輝度単位）。実用的な X 線の強さはレントゲンの発見（1895）から 70 年くらいの間は

精々 1~2 桁くらいしか向上しなかったことを思えばこの数字は驚異的だ。この光の出現で物質科学・生命科学とその応用分野全般にこの 30 年で大躍進があった。この光を日本では「放射光」と呼んでいるが、放射光研究施設、光源加速器は日本全国で 7 施設、14 台、全世界では 22 カ国、48 施設、65 台を数える (@2005)。

2. 第一世代の放射光利用 1962~65

電子シンクロトロン（ES）はそもそも光の発生などを旨して作られたものではない。出来た後にその光を使いたいという虫の良い希望者がやってきて、遠慮しながら使い始めてみると、これは凄いとということになったのが最初の数年間であった。これは世界中どこでも似たような経過を辿ったが、わが国では最初の実用的電子シンクロトロンが 1962 年から東大の原子核研究所で運転・共同利用を始め、そこに使わせると乗り込んできたのが小塩、佐々木の両名であった。小塩はその前年に核研 ES の設計仕様に基づき、その軟 X 線の分光強度を計算した¹⁾。この光は実用的な連続スペクトル光源の殆ど存在しない真空紫外の全領域をカバーするだけでなく、私が当時実験室で用いていたスパーク光源の最強輝線、水素の Lyman α と比べても

* 東京大学名誉教授 University of Tokyo, Professor Emeritus
(E-mail: tzsasaki@mwa.biglobe.ne.jp)

2桁以上強い。私はこの報告を読んで本気でこの光を利用しようと考え、小塩さんと一緒に核研に陳情して支援を要請した。この提案は核研当局や高エネルギー実験関係者にも好意的に受け入れられ、翌年我々はINS-SORという利用者団体を結成して光の利用に乗り出した。

63年の6月には核研が光の取り出し口を設置してくれて、INS-SORがビームモニタリング、軟X線分光器の試験を経て本格的な分光実験を試み、最初の成果を得たのが1965年3月であった。この成功によって放射光が原子内殻領域の電子過程を解明する極めて有力な手段だという期待が生まれ、物理学・化学の未踏の領域への探索が始まった²⁾。

ところがその結果、利用を希望する研究者が増えて限られた利用時間帯は忽ち過密になった。研究課題ごとの持ち時間は細切れになって成果を挙げるところか、時間内に実験が終わるかどうかも心細い。これでは大きな研究テーマに挑戦するなど夢のまた夢。そもそもこの時代の放射光利用は「第一世代」と呼ばれ、光源は自前でなく、ユーザーは「居候」の身分である。本来の加速器利用者である高エネルギー研究者が自分の都合でビームを止める、エネルギーを変える、電流を極端に絞るといようなことが随時起こる。「困るからそれはやめてくれ」とか「早くビームを出せ」など「居候」の分際では云えないのだ（云う人も居て騒動になった）。光実験用のマシンタイムも多少は頂戴したが、それも年に2週間程度、あとは「居候」の身分で仕事をするようになる。その居候タイムを細切れで配分するのだから、共倒れの危険は極めて大きかった。

苦勞の種はこれだけではなかった。初期のシンクロトロンは不安定で、軌道に乗る電子数は入射のたびに違うし、加速の途中で消えたり、位置が変化したりもする。これは光を電気信号として観測する場合、すべて雑音である。これが特に酷くなるのは国鉄と西武線の電車が車庫に入る深夜と、車庫を出る明け方である。当時は核研の一次電源の安定化が不十分であった。成果は出始めたものの、このままではいずれ行き詰まる、という予感を我々は持っていた。

3. 専用光源の模索³⁾ 1965

この当時、次世代の電子加速器として「電子・陽電子衝突リング」が提案され、欧米各国の加速器チームが試作や予備実験を始めて検討中であった。電子ビームを繰り返し入射しては捨てるシンクロトロンに比べて、入射した電子を軌道上に溜め込んで長時間保持す

る「蓄積リング」が光源としては安定性の点で遙かに優れている。後にTantalusと名付けられた小型のリングを光源に転用するというアイデアがアメリカで検討されていたのはこの頃だ。この装置はMURA (Midwestern Universities Research Association) が試験機として計画したものだが、この組織はやがて巨大陽子シンクロトロンを主力装置とするFermi Laboratoryにプロジェクトを切り替え、試作は宙に浮いてしまった。設計を担当したEd Roweがこれを光源に転用することを提案し、Wisconsin大学の物理科学研究所で運用を開始したのが1968年である。彼はこの計画を1965年に蓄積リングに関するFrascatiの国際会議で公表した。

1965年の時点では蓄積リングは試験機以上のものは動いていなかった。欧米の素粒子実験専門家の間ではその有効性に疑問の声が多く、論争が続いていた。その後1970年代の衝突実験の輝かしい成功を見た後では当時の論争は一体何だったのか、空回りの感を拭えない。一方日本では高エネルギー実験の次期装置は陽子シンクロトロンという既定方針で動いていて、電子陽電子の衝突リングという声は殆ど聞かれなかった。タナボタでシンクロトロンのご利益にあずかった我々ではあったが、この次も柳の下の泥鰌で高エネルギーの電子蓄積リングに便乗という手はどうもありそうにない。それに衝突実験用の装置では狭い一点に向けて電子と陽電子のビームを絞り込む。そのために軌道は強い収束と発散を繰り返す。おまけに衝突の後はビームが乱れて広がるだろう。光源としては余り面白くない。衝突マシンに便乗するよりも電子を貯めるだけの光源専用リングがあればその方が良い。当時放射光を用いて何がしか分光学の成果を挙げていた施設はいずれも第一世代の施設(NBS, 核研, やや後れてDESY)だったが、蓄積リングが将来有望だという認識では一致していた。

4. 専用光源の実現に向けて 1965~69

借り物の光源では労多くして功少なし、高エネルギー実験から独立した自前の加速器がほしい、という切実な要求からSOR-RINGが生まれた。

折角自力で作るなら、シンクロトロンでなくて蓄積リング、それも光源としての明るさや安定性を最優先の設計方針とする、というのは当然だ。

65年10月、岡山でのINS-SOR総会は専用光源の建設を目指して活動することを申し合わせた。その実現の方策は既存の電子加速器を持つ研究施設にリングを付設し、高エネルギー電子ビームの供給を受けるこ

とで早期の実現を目指す、というものである。この計画を側面から支援してもらうため、66年3月にINS-SORは物研連に提案と要請をした。物研連は計画の学際性に配慮して、核研野中、物性研三宅、プラズマ研伏見の3共同利用研究所長が協力して支援し、文部省への斡旋や研究機関との調整の労をとるという方針を採択した。具体的には既存の高エネルギー電子加速器を持つ東大核研か東北大核理研に受け入れを打診することになった。

この方針に沿って先ず東北大核理研に既存の線形加速器から電子ビームの供給を受けて300 MeVの蓄積リングを設置したい旨の申し入れをした。核理研は検討を約束したが、核理研自体の次期計画との調整も必要だったようだ。回答には長い時間がかかった。

東北大との交渉が中断していた2年間、私はハンブルクのDESYでドイツの放射光実験の立ち上げに協力していた。その傍らフランス、イタリアの試作機の実績などを調査し、当時大型の衝突リングDORISの設計を担当していた加速器専門家とも接触し、日本で建設すべき光源リングの仕様を一応300 MeV、100 mAで寿命1時間と考えていた。これは軟X線光源であって、特性波長は20 nmを越えるが、実用波長域としては2 nmまで利用できる。軽元素の主なものを研究対象に取り込んだ上で、実現性のある小型・低コストのマシンを目指す、というのがこの戦略であった。

さて私の帰国後1968年後半になって、東北大は線形加速器の増強とパルス中性子発生装置と電子蓄積リングの付設をセットにした将来計画(LBS)を立案し、それによってINS-SORの要望に応じたいと回答してきた。この案を軸に関係者の交渉が行われたが、結論を言えばこの交渉は不成立に終わった。その原因は蓄積リングを全国的に共同利用させてほしいというINS-SOR側の要請を東北大側が受け入れなかったことであった。

モタモタしているうちに関係者は全国の大学で燃え上がった大学紛争の渦に巻き込まれ、しばらくは専用光源の夢など何処かへ消し飛んでしまった。ところがその最中1968年の秋、核研武田所長からINS-SORに対して一つの提案があった。それは従来利用者の持ち寄りで辛うじて支えられていた貧弱なビームラインの設備を核研が「特別設備費」を申請して増強してやろう、という好意的な申し出であった。この概算要求枠は¥7000万。INS-SORではそれを受けて分光器、データ処理装置等、実験設備増強の計画を立てた。ところが高エネルギー部の山口省太郎主任からこ

の際特別設備費によって懸案の小型蓄積リング建設を計画しては、という示唆があった。

当初INS-SORはこの特別設備費で貧弱な測定器、周辺機器の充実を図ろうと考えていたが、まさかこれでリングが作れるとは思っていなかった。しかし省太郎さんは電磁石の磁極などは自分で工場に行って削ればよい、4重極磁石を用いずに、弱収斂型の磁場勾配を持った偏向電磁石を採用すれば経費に余裕はあり、一部の測定器も枠内で調達できる、という。核研のINS-SORに対するこの好意的な提案は千歳一遇の好機、これを逃せば次のチャンスは何時来るかも分からない。受けて立とうということになり、「リング+測定器」という欲張った概算要求案を核研に提出した。

こうした特別設備費の概算要求作成の段階で、68年12月、東大紛争の責任を取って東大の総長以下全学部長、全研究所長が総辞職するという前代未聞の大異動が起こり、武田所長が辞任してしまった。核研は全国共同利用研究所であり、人事が東大の学内自治の論理で左右されるのは共同利用の理念や慣例を犯すものだという批判があって、大きな波紋を呼んだが、結局覆水盆に還らず、この特別設備費案は後任の坂井光夫所長が引き継いで実現のために奔走してくれることになった。

69年度以後はINS-SORの核研常駐の流動研究員には東北大の佐藤繁が佐川敬と交代して着任し、以後この光源建設作業は同氏が軸になって進行した。光源建設を含む70年度の特別設備費概算要求はES委員会(電子シンクロトン委員会)でも承認されたが、条件付で、建設はSX(光ユーザーの核研所内名称)が担当し、核研高エネルギー部は助言するが、責任は負わず、建設チームにも参加しない、というものであった。但し高エネルギー部の職員が個人的に指導、援助するのはAcademic Freedomの範囲で妨げない、という理解があって、実際には指導・助言を超える協力をしてくれたメンバーも居た。

建設責任をINS-SORが負うのは当然だ。共同利用の責任を負う核研所員に本務以外の仕事を義務として押し付けるわけには行かない。しかしこの条件はINS-SOR内部に動揺を引き起こした。そもそもINS-SORが自前の光源建設を提案し、核研が予算請求を取り次いだというのに、いざ建設という段階になってINS-SOR内部は二つに割れた。運営委員会ではこの点で議論が紛糾し、INS-SORが建設の責任を負う、という案は否決されてしまった。中村、中井の両委員は「自前の光源が欲しいと云ったのは確かだが、自力で作ると言った覚えはない」。小塩委員長の見解は

「INS-SORの運営委員会も委員長も選挙で選ばれる。従って責任の継続性が保証されない。つまり最終的な責任を負う権限が無い」ということであった。しかし慎重論のホンネは「INS-SORは加速器に関しては素人だ。自力建設など無理だ。失敗したらどうするのか?」という悲観論であった。7名の運営委員会は賛成3(佐々木, 山口, 佐藤), 反対3(小塩, 中井, 中村), 中立1(佐川)に分かれ, 決裂した。INS-SORが責任を負わないというなら仕方が無い。賛成派がINS-SORに頼らず, 独立して建設チームを立ち上げるしかない。以後多少の曲折はあったが, 結局自力でやろうという有志が自発的に建設チーム(後記)を結成した。チームの責任者佐々木(東大教養学部)が核研客員部門の併任教官となって核研の内部で予算執行の権限を持ち, 所長に対して計画実行の責任を負うという形で核研も了承した。坂井所長は「建設が順調に進行している限り核研は「建設チーム」を信頼してすべて任せるが, もし必要があれば云って欲しい。どんな援助でもする」というスタンスで応援してくれた。建設チームが坂井所長に無理を頼んだのは設備を物性研に移管する最終年度末に残った未払い請求書¥367万の処理だけであった。

素人が加速器作りに乗り出す, などというのは一見無謀かもしれないが, 核研には既に15年に及ぶ電子シンクロトロン建設・運転・共同利用の実績を積んだ強力な加速器チームがいるのだ。その先達の知識経験に学ぶ機会はある。私自身は失敗するかもしれないなど一度も思ったことはなかった。電子蓄積リングに関しては先行するフランス, ソ連, アメリカで実績があり, ノウハウも公表されている。この時既にOrsayのACO, WisconsinのTantalusは稼動していた。何も原理的に無理なことをやろうという訳では無いし, 残念ながら前人未踏の事業でもない。素人なら謙虚に勉強し, 先達に教を請えば良いではないか。ローレンスだってサイクロトロンを初めて作ったときは素人だったのだ。玄人というのはなまじ知っていると思ってなめてかかったりすると却って危ない。ただし超高真空技術だけは核研ESチームも未経験で, この時点では開発要素が大きく, 禪を締めてかかる必要があった。

坂井所長は核研の70年度概算要求の交渉過程で文部省から蓄積リングの意義や設計について詳しい説明を聞きたいと求められ, 69年秋, 私と佐藤繁さんが所長に同行してヒアリングを受けた。学術課の笠木課長, 重藤課長補佐, 大山専門員他数名が学術課の会議室で長時間の説明を聞いてくれたが, 学術課では計画

に強い関心を寄せ, 「予算を付けたいが, 71年度からではどうか? 但し設計とか予備実験, 試験研究を直ぐに始めたいというなら, 70年度は文部省留置予算から一部を前倒し援助することは可能だ」という。当方は全く異存なく, 計画は実質的には70年度からスタートした。

ヒアリングが終わって雑談に入ったとき, 大山さんがいささか気になる発言をした。「先生方はこの装置が完成した後, 何年くらいこれで研究をなさるおつもりですか?」。どうしてそんなことを聞かれるのか, 真意が分からないまま, 「折角苦労をして作ったものを, 3年や5年で止めるわけには行きません。最低10年, 出来れば20年はやらして下さい。そのくらいは充分成果をあげられると思いますよ」と答えたが, 「20年ですか。弱ったなあ。これは少し考えなきゃ」。何が弱るのか, どうも話は少し微妙な領域に入って来たらしいと察して深入りは避けたが, 後になって文部省の困惑の背景が何となく分かってきた。それは行政改革の一環として政府が各省庁の研究機関の統廃合・見直しを進めており, 文部省も所轄の国立大学付置研究所の評価を内部で進めて縮小・廃止の候補を洗い出していた形跡がある。核研の電子シンクロトロンは当時老朽化が進み, 随所にトラブルが発生して大規模改修の必要に迫られていた。その老朽状況の詳細な報告書や改修のための概算要求はすでに文部省に提出済みである。文部省は大規模改修を認めるよりは, この際シンクロトロンに引導を渡して数年後に安楽死させるというoptionを検討していた節がある。しかしSOR-RINGの建設を一旦認めてしまえばESをこのまま放っておく訳には行かない。つまり補修予算にゴーサインを出すということだ。省太郎さんがINS-SORにリングを作れ, と発破をかけたのは, ESの大改修を文部省に迫るウルトラCだったのかな, と後から勝手に想像した。結局間もなくESの補修予算は認められ, 山口主任の後に本郷から着任した富家主任がESの改修工事の指揮を執った。SOR-RINGは1975年の完成後物性研の管理下で共同利用され, 1997年まで活動したから, まさに初心を全うして20年余り活躍したのだ。それと共に親のシンクロトロンも生きながらえる運命となったのである。

5. 基本設計の変更 苦心のやりくり 1970

70年度は留置¥800万で設計作業と真空の予備実験を開始した。最初省太郎案の弱収斂方式で予算を見積もったが, 検討の結果, 軌道のパラメタを自由に調整できる強収斂方式, つまり四重極磁石の導入が有利

で、ACO の例など世界の大勢は強収斂型だという片山さんの意見を採用して設計の変更を決意した。ところがこれで予算を算定しなおすと「特別設備費」は目いっぱい必要で、測定器を購入する余裕は全く無い。苦勞の末、設計変更による費目の変更を所長、文部省当局の了承を取り付けて実行することになった。

さて特別設備費の全額をリングにつき込むことになったが、それでも予算は厳しい。RF は核研 ES の初期に用いた空洞と電源が御用済みで倉庫に保管してあったので、お下がりをご頂戴して無償で済むことになったが、四重極磁石が追加になって、7000 万の予算では電磁石、真空系の予算をいくら切り詰めても足りそうも無い。見積もりを取ったら足が出ることは必至で、こちらから予算を提示して業者と交渉した。幸い真空系は日本真空 (ULVAC)、電磁石は住友特殊金属、ビーム輸送系ではトヤマが何れも出血価格で引き受けてくれて何とか目途が付いた。無償で済ませた RF も高周波電源の真空管がもう製造中止で、寿命が尽きればお終いという際どい代物だったが、どうにか試運転を乗り切った。

RF については試運転後 75 年に一般 A の科研費 ¥3000 万を申請して空洞と電源を新調した。76 年以後の共同利用にはこれで間に合った。その他 70 年度に小塩高文を代表とする三菱財団の研究費申請が通って、その中から一部を回してもらってビーム輸送系の経費に当てた。合計で建設費は約 ¥1.2 億。後に或る国際シンポジウムで光源加速器製作コストの国際比較の試みがあり、電磁石の重量で規格化した製作費のデータを比較したが、SOR-RING はダントツの低価格マシンであった。

6. 軌道設計と分布排気系 1970~73

1970 年の準備期間は軌道設計と真空系の予備実験でスタートした。軌道設計は大学院学生の宮原恒昱君の担当であったが、短期間に片山先輩の集中的な指導を受けて軌道計算の力量を付け、見事に軌道設計の責任を果たした。比較的低いエネルギーの蓄積リングであるため、Touschek 効果（電子電子の散乱損失）を少なくする配慮が必要で、磁場の非線形性を利用して縦横の振動を結合させ、ビームを垂直方向に膨らませることで電子密度を下げる作戦を取った。そのために宮原君の設計では偏向磁石に $n=0.5$ の軸方向の磁場勾配を与えてある。これは寿命を長くするためにエミッタンスを犠牲にするという、第三世代の高輝度光源とは逆の発想だが、真空よりは電子密度が寿命を支配する低エネルギーリングの特性を考慮した方策であっ

た。

1970 年は集積回路の微細化が指数関数的に進みだしたムーアの法則元年である。その背景には超高真空、薄膜製作技術の急速な進歩があった。しかし日本では大学など研究機関への超高真空技術の導入が欧米に比べて大幅に遅れていた。蓄積リングは電子ビームを軌道上に長時間保存するので、超高真空が不可欠である。しかしこの技術だけは核研にも無かった。おそらく日本中どここの大学にもなかったであろう。70 年に軌道設計と平行して真空の予備実験からスタートしたのはそのためである。蓄積リングの真空技術上の問題点は電磁石の磁極の間に置かれる狭い真空配管のコンダクタンスが小さいことである。しかもこの磁極間隙で電子が発光し、それが容器の壁に当たってガスを放出する。つまり排気がしにくいだけでなく、ガスの発生源がこの部分に集中する。従って大部分のビーム損失がここで起こる。これを解決するアイデアが当時イタリアで提案されていた。それは電子軌道に沿って真空路の内側にポンプ素子を並べ、偏向電磁石の洩れ磁場を利用してペニング放電をさせるという案である。直線部に配置した大型の真空ポンプだけでなく、軌道上全周に分布配置したポンプで排気しようという考えだ。これはまだ完成技術ではなく、欧米でも試験中だったが、こちらもモデルを試作してどのくらいの排気力があるのかテストした。

我々のやり方は欧米のモデルとは少し違って、素子を軌道の内側でなく、敢えて外側に配置した。もう一つはペニング放電素子の円筒形の陽極に沢山の孔を開けてスカスカにするというデザインである (図 1)。こうすると中性の気体分子は電極間の隙間だけでなく、陽極の全面に開けた孔からも入れるので実効的な開口が大きい。軌道の外側には光が直接来るので、放電領域に入った中性分子は忽ちイオン化する。一旦中に入ってイオン化すれば電場と磁場の力でトラップされ、外には出られない。排気速度はこの光イオン化のために増大するはずだ。300 MeV では放射光の熱

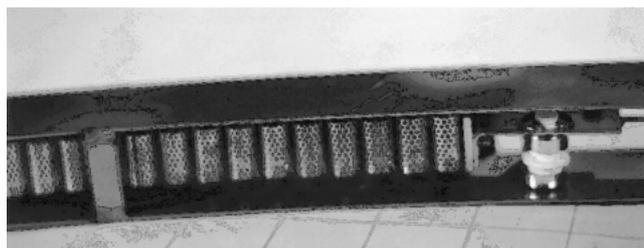


図 1 分布排気系¹⁵⁾

負荷は小さいから外側で差し支えない。

この方式の排気素子を設計製作、試験したのは駒場の修士課程の院生遠藤真廣君で、辻川技官の指導を受けて見事な分布排気系を完成したが、試験結果は上々で、実用化してリング全体の真空系で排気能力の大きな部分を受け持った。

分布排気系という新しい技術を導入するに当たって、素人の我々が何か基本的な間違いを犯してはいないか、専門家のチェックを受けた方がいい、と遠藤君を東大生産研と工学部応用物理の専門家がやっていた真空ゼミ（代表富永五郎教授）に参加させてもらい、私も顔を出して遠藤君の計算や実験について助言を受けた。当時の日本の真空学界は残念ながら超高真空以前の水準で、積極的な指導を受けるのは無理だったようだが、それでも我々のやっていることが真空技術の基本から外れていない、という保証を受けるのには役立った。遠藤君の試作した分布排気素子の写真と試験結果を持って私は CERN に行き、当時超高真空技術では世界のトップを独走していた CERN 真空部門長 Dr. Fischer の判断を仰いだ。同氏の判定によると、排気速度の測定法に問題があって排気速度が実際より低く見積もられているが、デバイスそのものの性能は優れており、充分実用になるとのお墨付きをもらった。

超高真空にするには通常先ずシーズ・ヒーターを用いて焼き出しをする。ところが真空容器の寸法を磁極間隙ぎりぎりまで取ったので、その仕掛けをする余地が無い。そこで「直接通電法」を採用した。つまりリングを一周するドーナツに直接電流を流して加熱する方式である。高周波空洞は別途焼き出しをするので、それ以外のリング全周を回路として直流電源を接続した。溶接ベロウズの両側のフランジには銅のボルトを通してバイパスする。磁極間の熱絶縁用には 50 ミクロン厚のカプトン・フォイルでドーナツを巻いた。先ず 1 A の定電流電源を用いて全周にわたって抵抗測定をし、その上で熱電対や温度センサーで温度をチェックをしながら大容量の直流電源で通電する。宿泊施設から多数の扇風機を借りてきて温度調節をしたが、通電から最初の 1 時間くらい細かい修正をした後は 2 日間くらいの焼きだし期間中は放っておいても順調に働いた。さて焼き出しが終わって全排気系を作動させると順調に圧は下がって行ったが、 2×10^{-9} Torr の値でピタリと止まって針が動かない。全員で「真空漏れ探し」の作業をしたが、漏れは何処にも見付からない。宮原君が「こうなったらポンプを疑うしかない」と言い出して、直線部の市販ポンプを 1

台ずつ外して点検した。その中の 1 台に電極導入部の緩みを発見して、それを締めなおしたら忽ち 10^{-10} 台に入って行った。1978 年に刊行された「核研 20 年史」に載っている SOR-RING の性能仕様では無負荷の圧力は 7×10^{-10} となっている⁴⁾。

7. 電磁石の製作 1970~73

偏向磁石、四重極磁石、ビーム輸送系を含めて電磁石関係は佐藤繁氏が担当し、後に完成した磁石の据付作業の段階から東北大学の石井武比古氏が加わった。

住友特殊金属（住特金）は加速器用の電磁石の製作経験がなく、出血受注になっても経験のためにやってみようと考えたようだ。佐藤繁さんは Engineering Sense が良く、手堅い設計を殆ど一人でやり遂げた。住特金の山崎工場での立会い検査には経験豊富な山川さんをヘッドに核研 SX の面々が乗り込み、測定装置も持参で検査を実施した。磁石の検査とはどういう手順で何をやるのか、検査会場には住特金の技術者や工員 20 名余りが立ち並んで見守っていた。

ところが納入後、全数検査の段階で宮原君がコイルの絶縁不良を発見し、コイルの巻きなおしのために工場に送り返すというトラブルが起きた。散々値切った後にまた損をさせることになったがこちらも後には引けない。気の毒であった。住特金の営業責任者は「高い授業料だ」とこぼしていた。

電磁石の据付作業には石井さんが参加してリング棟の床の仕上げ段階から指揮を取った。リングが小さいので偏向磁石の配置作業にはリング中心に測量機械を据付け、電磁石背面の野書線を睨んで水平面を出したり、各偏向磁石の曲率中心からストレイン・ゲージを伸ばして軸距離を決めたりした。この作業までは順調に進んだが思いがけぬ災難にあって作業は停滞した。

電磁石のコスト節約のため、コイルに流す冷却水の配管を SUS でなく、塩ビパイプで代用する設計で発注してあった。ところがこれが災いして思いもしなかったオイルショックの被害を受けた。1973 年のオイルショックは全ての石油関連製品に及び、塩ビパイプの納入は大幅に遅れた。おかげで 73 年度中に終了する予定の電磁石の通電試験は 74 年夏までお預けになった。

8. リング棟の建設 1972

SOR-RING と ES の位置関係は図 2 に示すとおりである。ES 棟に隣接して新しい建物を建設することになり、1972 年夏から約半年でリング棟を建設した。ES の遮蔽を撤去し、熱交換器の移設、基礎工事の際

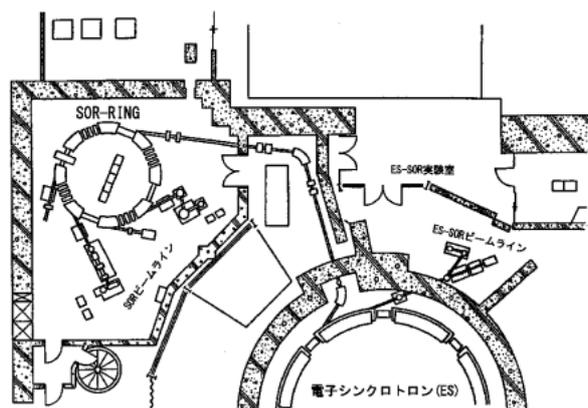


図2 核研電子シンクロトロンとSOR-RINGの配置
図¹⁴⁾

の根伐りに当たって地下埋設物、つまり電気配線、上下水配管などの移設が必要であった。それも現に生きて使用されているものを切り替える工事は関係者との調整が難題で、これに多くの時間と労力を費やした。工事の責任は建設チームにあるので、佐々木、佐藤、渡辺の3人が交代で現場に常駐し、すべての工事に誰か一人が必ず立ち会った。建物は3階建て、1Fにリングとビームライン、実験装置の入るフロアがあり、これを見下ろす中二階に制御室、2Fは実験室と準備室、倉庫、3Fに空調設備を入れ、屋上にはSOR-RINGとES両方の熱交換器、イオン交換機を置いてある。空調設備は昔東大理学部にあったパラメトロン計算機PC1用の空調設備が不要になって保管してあったものを、施設部の斡旋で譲り受けて移設した。工事中には基礎工事用の穴掘りの最中に素研準備室が無届で敷設した電源ケーブルをショベルカーが引っ掛けて全所停電を起こすという事故もあったが、幸い人身事故にはならなかった。

9. ビーム取出しと打込み 最初の蓄積 1974

オイルショックによる塩ビパイプ管の納入遅延で半年以上の待機の後、74年夏にようやく全部の電磁石の運転が可能になり、ビーム輸送の試験に取り掛かった。

ESは最大エネルギー750 MeV、21 Hzで廻っている。これを毎秒1回、300 MeVで電子を取り出し、図2のような輸送路を通してリングに入射する。加速の途中300 MeVで正確なタイミングと立ち上がりの早いパルス磁場をかけて前後のバンチに影響を与えないようにビームを取り出す。リングへの入射も同様に早いパルス磁場を作動させて電子の運動を軌道と平行

に修正する。その時既に軌道上にある電子と衝突させないように、180度位相のずれた反対側の直線部にもパルス磁場を働かせて入射の瞬間に軌道をずらせておく。入射直後の電子は減衰振動しながら軌道を何周かするうちに安定軌道に収束して既存のビームと合流する。入射路とリング内軌道は隔壁で分離され、二つの真空路の仕切りにはカプトン膜を用いた。これは偏向電磁石の熱絶縁に用いたのと同じものである。カプトン膜は超高真空に適し、機械強度も十分で、1年間使用した後に損傷を検査したが、全く異常がなく、電子衝撃に耐える真空隔壁としては完璧であった。

ビーム取出し、打込みは渡辺誠、宮原恒豊、北村英男の諸君の担当であった。立ち上がりが早く、ジッターの少ないパルス電源の開発にかなりの時間を要したが、幸いこのシステムは正常に作動した。最初の試験はESのビームタイムを申請して実施したが、ESの運転に支障がないことが分かったので、その後はES運転中随時抜き取りを実施してもよいという許可をもらった。ビーム輸送の試験は輸送路に十字を書いた印画紙を置き、ビームを送っては現像して位置を確認、磁場のパラメタを逐次修正するという原始的方法を採用したが、結構これで調整は順調に終わった。被爆した印画紙を取り出して現像するのは年寄りの仕事だ、と若い諸君が敬遠するのですべて私の担当になった。

入射点までビームが到達したことを確認した後、入射蓄積の試験は1974年12月14日の夕方から始まった。入射点のセプトラムと反対側のキッカーから成る一対のパルス磁石のタイミングや電圧の調整を繰り返しているうちに、何度もヒューズが飛んで手持ちが残り少なくなってきた。これは大変、とサンケン電気に電話をかけ、ヒューズを至急入手したいと交渉し、幸い当直の担当者がOKしてくれた。その夜は雨が降っていたが、私の運転で会社に近い東武線(?)のガード下に車を止め、誰もいない暗闇の中で山川さんが傘をさして車を降り、待っていた当直社員からヒューズ一箱を受け取った。何やら麻薬の取引でもするような光景であった。ヒューズは幸い役に立って間もなくビームが貯まりだした。「貯まった!」と一時打ち込みを止めて全員が制御室から駆け下り、皆で最初の光を見た(図3)。一点にじっと静止したまま瞬きもせず、何時までも光っているのが神秘的であった。もう一度制御室に戻って入れなおしてから見た光は強烈であった。この日はシステムの総合試験が目的で、設計仕様の達成までには未だ多くの仕事が残っており、時間もかかる。蓄積を確認したところで打ち止めにして祝杯を挙

当時の真空技術の教科書には無酸素銅といえども超高真空用には落第だと書いてあった。そこで空胴の円筒部をステンにして円盤部表面を無酸素銅にするという案を採用した。無酸素銅とステンレスとを爆縮で張り合わせるクラッド板という技術があり、円盤部はこれを使用した。

ところが科研費申請時に内定していた日本電気がこの値段では受注できないと云って下請けを紹介してきた。それは大田区の町工場で、超高真空には全くの未経験、仕上げの要領を細かく指示したにも拘らず、焼き出しを始めた途端黒煙濛々、洗浄不十分で酷いことになった。工場に戻して洗浄をやり直し、いざ試運転となって驚いたことに、今度は高周波のパワーを入れた途端に空胴の中央部に入れた「マルチパクタリング防止」用の金属リングが赤熱して、真空度は急激に悪化した。石黒さんが「スペアナ」を借りてきて周波数分布を調べると、3倍高調波が異常に強い。計算してみるとこの空胴の構造では3倍波の腹がちょうどこのリングの辺りになる。この金属リングは核研ESのRFで、これがないと空胴内で放電が起って高周波のパワーが失われてしまうという経験から導入したものだ。これを除去したら何が起きるか、とにかくやってみようということになり、リングや支柱の金具を一切取り外した。ところがアラ不思議、放電も起こらず、ガスの放出も嘘のように消えてしまった。この辺がRFの難しさ、奥の深さで、先達の教えも金科玉条ではないことを学んだ。

この新規製作の高周波空胴はその後順調に仕上がって1976年に共同利用する時期までには充分間に合ってリングの完成に貢献した。電源の製作にはこれも日本電気からは相手にされず、子会社の日本高周波を紹介された。日本高周波は当時破産整理中で、会社に行くといつも争議中、工場内には赤旗が一杯立っていた。しかしこの電源はしっかりしていて、パワーにも充分余力があり、不安を抱えながら運転した初代のRFのような心配はなかった。

76年の運転再開後、建設チームが最初に目指したのは300 MeV、100 mA、寿命1 hrという当初仕様の達成である。この間の「枯らし運転」の経過を示すデータが図5である。夏休み明けの9月から始まった作業で、翌77年の1月末に仕様が達成された様子が分かる。目標達成に要した時間は約5ヶ月であった。設計仕様を達成した後、建設チームは解散して物性研SOR施設に作業を引き継ぎ、その管理下で共同利用が開始された。SOR-RINGは1997年に活動を終了するまで21年間にわたって運転を続け、物性研

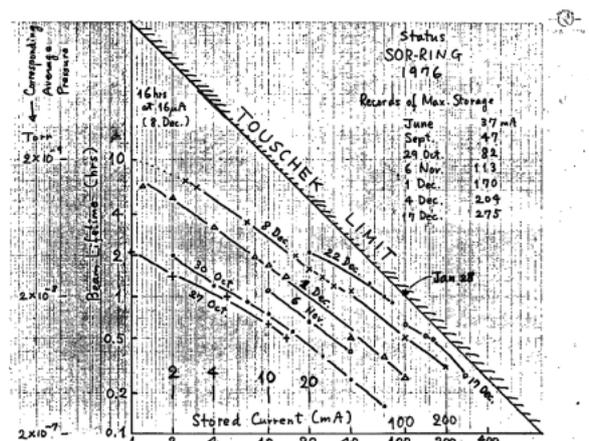


図5 1976年の「枯らし運転」記録。横軸は蓄積電流 (mA)、縦軸は寿命 (hr)。Touschek Limitの線はTouschekの実験結果(1964)からの推定値

表1 SOR-RINGの主要パラメタ^{4,13)}

		@1977	@1997
電子エネルギー	MeV	300 (250~400)	500
最大蓄積電流	mA	330	500
寿命	min.	47@200 mA	350@200 mA
		74@100 mA	
偏向部曲率半径	m	1.1	1.1
磁場	Tesla	0.909@300 MeV	1.51@500 MeV
軌道長	m	17.4	17.4
RF周波数	MHz	120.82	120.94
バンチ数		7	7
ベータatron数	v_x	1.28	1.23
	v_y	1.21	1.20
α_c		0.9	0.64
減衰振動時定数 τ_x, τ_z	msec	54, 54	14, 11
	τ_s	27	5
ビーム断面 (σ_z, σ_x)	mm ²	0.4 × 1.6	
平均気圧 無負荷	Torr	7×10^{-10}	
	100 mA 負荷	$< 5 \times 10^{-9}$	
特性エネルギー	eV	54.4 (37.8~96.7)	252

施設代々のスタッフによる改善努力の結果、性能は更に数次の向上を経て表1に示す最終仕様に達した¹³⁾。

11. あとがき

SOR-RINGが当初から放射光発生用の蓄積リング

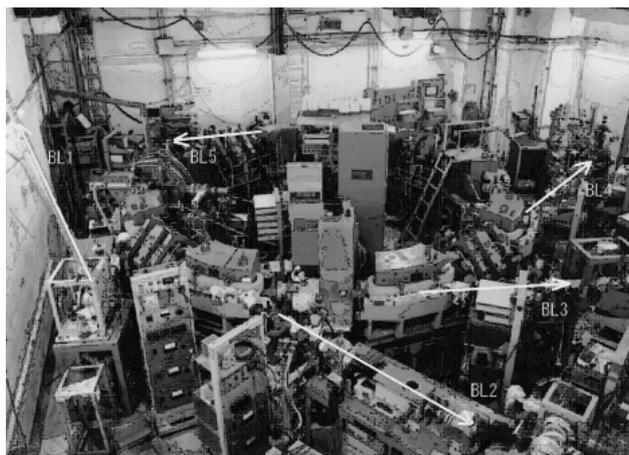


図6 SOR-RING 実験室全景

として設計製作された、いわゆる Dedicated Synchrotron Source として世界最初の装置であることは国際的に認知されている⁵⁻⁹⁾。加速器専門家でないユーザーの手で建設された、という点でも他に類が無い。Tantalus はこれより6年前から光源として利用されていたが、既に述べたようにこれは光源として建設されたものではない。それにも拘らず、このマシンはアメリカ内外の放射光分光研究者に愛用され、多くの成果を生んだ。専用光源の価値はこの光源を使った多くのユーザーが実感していた。その創始者 Rowe 自身が SOR-RING が “the first purposely built electron accelerator for synchrotron radiation research” だと明言している⁶⁾。SOR-RING に8年遅れて誕生した英国 Daresbury の SRS は放射光 X 線を発生するという点では筑波のフォトン・ファクトリー PF や Brookhaven の NSLS に先立って稼動した最初の専用 X 線放射光源である。SOR-RING は軟 X 線の分光が主な用途で、硬い X 線は発生しない。放射光による X 線結晶学は 80 年代に相次いで完成した SRS, PF, NSLS で始まったのである。

SOR-RING は物性研の共同利用施設として21年間にわたり多くの研究者に利用された後、核研の活動停止に伴い1997年に運転を終了し、INS-SOR の活動も35年の成果を集約した2回の記念講演会によって幕を閉じた¹⁰⁾。現在は SOR-RING は播磨の SPring-8 のキャンパス内で展示公開されている¹¹⁾。図6は現役で活動していた時代の SOR-RING と実験室の全景である。

このリングの建設と運転の成果は宮原恒昱(東大)、

北村英男(京大)の学位論文として公表され、専門誌 Particle Accelerators にも掲載されている¹²⁾。表1には「核研20年史」¹⁴⁾に記載された初期の性能と、物性研の後継者諸君の絶え間ない性能向上の努力によって達成された最終仕様¹³⁾とが併記してある。

苦労話はきりが無いが、もうこの辺で打ち切って、The last but not the least, 謝辞だけは書いておきたい。計画のすべての局面で温かい援助と励ましを頂いた伏見康治先生、坂井光男所長、山口省太郎先生(故人)に心からの感謝を捧げます。この計画を取り上げて頂いた文部省学術課の重藤学爾、大山超両氏の英断にも負うところが大きい。欧米の研究者にも多くの助言を受けたが、特に Wisconsin の Dr. Rowe, CERN の Dr. Fischer の助言は有益であった。

参考文献

- 1) T. Oshio and M. Sasanuma, INS-TH No. 43 (1962).
- 2) 小塩高文, 笹沼道雄, 佐々木泰三, 日本物理学会誌 **22**, 285 (1967).
- 3) 佐々木泰三, 固体物理 **22**, 1007 (1987); 固体物理 **23**, 142 (1988).
- 4) 核研20年史 1955~1975 東京大学原子核研究所 1978.12.1
- 5) An Assessment of the National Need for Facilities Dedicated to the Production of Synchrotron Radiation, 1976, National Academy of Sciences, Washington, D.C.
- 6) E. M. Rowe, The Synchrotron Radiation Source, in Synchrotron Radiation, 1979, ed. C. Kunz, Springer Verlag, Chap. 2.
- 7) P. L. Hartman, Nuclear Instruments and Methods **195**, 1 (1982).
- 8) E.-E. Koch, D. E. Eastman and Y. Farge, Handbook on Synchrotron Radiation, Vol. 1a, North Holland Publ. Co., 1983, Chap. 1.
- 9) H. Winick, Synchrotron Radiation Sources, A Primer, World Scientific, 1994, Chap. 1.
- 10) INS-SOR 1963-1998, INS-SOR 記念講演会世話人会, 1999年10月
- 11) 佐々木泰三, 加速器 **1**, 36 (2004).
- 12) T. Miyahara, H. Kitamura, S. Sato, M. Watanabe, S. Mitani, E. Ishiguro, T. Fukushima, T. Ishii, S. Yamaguchi, M. Endo, Y. Iguchi, H. Tsujikawa, T. Sugiura, T. Katayama, T. Yamakawa, S. Yamaguchi and T. Sasaki, Particle Accelerators **7**, 163 (1976).
- 13) Activity Report of Synchrotron Radiation Laboratory, ISSP, 1995, p. 3; 1997/1998, p. 4.
- 14) 軌道放射物性研究施設 1975 東京大学物性研究所 (パンフレット)
- 15) SOR-RING の建設 写真による記録 (1970~1975) CD.