「加速器」Vol. 2, No. 4, 2005（523–535）

国際協力

タイの放射光計画の顛末

磯山　悟朗*

Full account of the Siam Photon Project

Goro ISOYAMA*

Abstract

The Siam Photon Project is a project conducted by the National Synchrotron Research Center (NSRC) of Thailand to construct a synchrotron radiation facility at Nackhon Ratchasima in Thailand, which is based upon the accelerator system donated by SORTEC Corporation in Japan. The project began in 1996 and it was practically directed by Professor Takehiko Ishii till 2005. This article describes, from a view point of a Japanese accelerator physicist, when and how the SORTEC accelerator system was dismantled and transported from Japan to Thailand, the building of the Siam Photon Laboratory was constructed, the Siam Photon Source was assembled and commissioned, and performance of the accelerator system was improved in these 10 years.

1. 序　　論

タイ国政府は，日本からソルテク（SORTEC）光源加速器システムを寄贈されて，放射光研究施設を建設して運営することによりタイ国の科学技術の振興と人材の育成を目指す事業を行なった．石井武比古氏（東京大学名誉教授）は，サイアム・フォトン・プロジェクト（Siam Photon Project）と呼ばれるこの計画を遂行するために1996年から2005年6月までの10年間にわたり国立放射光研究センター（National Synchrotron Research Center, NSRC）の立上に尽力された[1–2]．

SORTECは，放射光を用いたマイクロ・リソグラフィーにより，大規模集積回路を製造する基盤技術を開発するために通産省（当時）の外郭機関である基盤技術研究促進センターと民間企業13社が出資して1986年に設立された株式会社である．10年の時限が経過して，加速器システムを解体廃棄するに際して引取り手を探していた．SORTEC光源加速器システムは，1 GeV電子ストレージリングと，その入射器である1 GeV電子シンクロトロン，ならびに40 MeV電子ライナックより構成される[3]．他方，タイ側では，放射光施設を持ちたいという希望が早くから有ったが，それを如何にして実現するかについて議論されていたと聞いた．両者を結び付ける仲人役をはたしたのが石井武比古氏である．1996年1月3日から7日までタイのバンコクで，日米欧の放射光研究者を招待してタイが開催したワークショップ（Regional Workshop on Applications of Synchrotron Radiation）が一つの契機であった．同年1月29日にタイの学術と行政の有力者一団が来日してSORTECを視察した．これらの活動を受けて1996年3月5日の閣議でNSRCの発足が決定された．

サイアム・フォトン・ラボラトリ（Siam Photon Laboratory）と名付けられたNSRCの放射光施設が設立された場所は，タイの首都バンコクから北東に約270 kmの距離にあるナコーン・ラチャシーマという都市の郊外である．ここにスラナリ工科大学（Suranaree University of Technology, SUT）の広大なキャンパスの一画に新しい放射光施設が建設された．

日本から多数の放射光加速器と測定系の有志がこれに参画して計画の遂行に協力した．筆者は，1996年から2005年まで加速器関係の一員としてこの計画に協力してきた．筆者の記憶と保存文書を基にして日本からの視点で，10年間の光源加速器システムの建設と立上，性能向上について記したい．

2. 第1期計画―光源加速器の解体と運搬―（1996年3月～1997年1月）

NSRCの活動は，1996年3月頃から東京のJR恵

* 大阪大学産業科学研究所　Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
（E-mail: isoyama@sanken.osaka-u.ac.jp）

比寿駅近くにあるタイ国日本大使館科学技術参事官事務所で始められた．参事官事務所と言っても恵比寿の住宅街にある2階建ての普通の民家で，この1階部分をNSRCが借用して事務所として使用した．ここで活動したのが石井武比古氏，イッティー・リッタポーン氏（現タイ・マイクロエレクトロニクス・センター所長，国立電子コンピュータ技術センター副所長），山川達也氏（高エネルギー加速器研究機構名誉教授）である．また，1996年10月初めに，ビラポン・パイアスワン氏（現NSRC所長）も来日して一時期NSRC東京事務所の活動に参加した．

ここでの仕事は，SORTECから加速器を正式に譲り受ける事と，加速器システムを分解・梱包して，タイに輸送し，再度組み立てる準備である．加速器の譲受交渉に関して，SORTECの出資者である基盤技術研究促進センターは，実質的に日本国政府である．東京事務所が活動を始める以前に石井武比古氏は，タイ放射光研究計画書（サイアム・フォトン・プロジェクト）を作成して通産省に提出した．加速器システムの簿価が何億円か残っていたが通産省と大蔵省（当時）の協議の結果，SORTEC施設の無償供与が可能になった．1996年8月末にNSRCとSORTECとの間で，放射光設備をNSRCに移管することが正式に合意された．加速器システム移設の作業は，SORTEC加速器システムを建設した三菱電機と東芝ならびに幹事である三菱商事の3社を相手にして必要経費の見積作業と価格交渉から始まった．また，加速器システムの海外への搬出になるので，通産省の輸出許可を取る必要もある．

この時点で最大の問題点は，移設に必要な費用の問題である．初期の見積り額は，ストレージリングの移設で20億円，シンクロトロンの移設で10億円の合計30億円であった．この見積は，光源加速器システムを新設することが出来る金額であるので，SORTECの加速器システムの寄贈を受ける意味が無くなるという点で本質的な問題である．因みにSORTECの加速器の購入価格は，ライナック3億1000万円，シンクロトロン9億8400万円，ストレージリング13億300万円，計算機制御3億8000万円，電源補償装置7700万円，冷却水システム2億4300万円，放射線監視システム5200万円の合計33億4900万円であった．担当3社との価格交渉は精力的に行なわれたが，実現可能な額と1桁の違いが有るので，容易に解決できる問題では無い．SORTECの筑波研究所は，つくば市の北部工業団地の一角にあったが，敷地は借地であり，建物を取り壊して更地にして返却する期限が迫っていたので早急に加速器を搬出する必要があった．そこで，計画を見直し，加速器システムを分解・梱包して，タイに輸送するまでを第1期計画，再組立は第2期計画として，第1期計画の契約を結んだ．契約した金額は三菱商事と，三菱電機，東芝担当分の合計で2億円弱である．

SORTEC光源加速器の解体と搬出は1996年10月14日に始められ，12月13日に終了した．解体した加速器は船便でタイに搬送するため輸出用の梱包をした．船倉の温度や湿度が非常に高くなる可能性があることと，輸送時間が長いために劣悪な環境に長期間晒されることなどにより，船便で精密機器を輸送する場合には厳重な梱包をする．具体的には，アルミコートをした樹脂製のシートで機器全体を包み，内部に乾燥剤を入れて密封したものを木箱に納める．この様な木箱が東芝担当分で89箱あり，その容積は合計667立米，三菱電機担当分が70箱，合計350立米である．体積と箱の数から計算した平均的な箱の大きさは東芝分で一辺が2 mの立方体，三菱電機担当分で1.7 mの立方体になる．これらの貨物をタイに向けて送り出すため，1996年12月24日に横浜港で輸送船オリエンタル・キングに船積みした．2段積みにした箱をクレーンで吊り上げる時に，鉛シールド板を入れた東芝の箱が落下し，その衝撃で三菱電機の八極磁石とチタンポンプを入れた箱も共に落下して壊れた．しかし，これら内部の機器の破損と損害は軽微であったので，そのまま船積みし，次の寄港地である神戸で梱包をやり直して送り出した．

年が明けて1997年1月6日に輸送船は，バンコクから130 kmの距離にあるタイのラムチャバン港に入港した．パトカーに先導されたトレーラー14両が第一陣として1月9日に，第2陣が1月10日にNSRCに到着した．スラパット3と呼ばれるNSRCの建物は，科学博覧会用に建築された長さ192 mで幅が30 m程度の空間を持つ広大なものである．ここに合計159個の木箱を並べて設置した．機器をねずみの害から守るために，大きな箱は1個，小さい箱は数個まとめて，その周りをブリキ板で作った高さ30 cm程度の塀で取り囲んだ．

日本から荷物を送り出した後，第2期計画を遂行するため石井武比古氏は1996年12月18日にタイへ出発した．また，イッティー・リッタポーン氏も少し遅れてタイに向かった．恵比寿のNSRC事務所は閉鎖したが，川崎に部屋を借りてNSRC東京事務所を残し，森多美子氏（東京大学物性研究所）が事務処理や連絡の任にあたった．

3. 光源加速器システムの設計

第2期計画の中核をなす光源加速器システムの再組立に関する検討は，1996年夏から行なった．SORTECの電子ストレージリングは，放射光によるマイクロ・リソグラフィーの研究に最適化されていたので，エミッタンスが大きく挿入光源を設置する長い直線部も無い．1996年1月にバンコクで開かれた前述のワークショップでの議論を受けて，放射光光源である電子ストレージリングを改造して，電子ビームのエミッタンスを低減すると共に挿入光源が設置できる長い直線部を設けることにした．入射器である1 GeVシンクロトロンと40 MeV電子ライナックは，そのままの配置で使用する．

筆者は，第1期計画の移転作業には加わらず，この期間もっぱらストレージリングの設計作業を行なっていた．この作業に参加するためタイからプラサート・ケンカン氏（コンケン大学講師）が1996年9月1日から10月30日までの2ヶ月間と，1997年6月30日から8月10日までの1ヶ月余り大阪大学産業科学研究所に滞在した．また，同時期にナラ・チラパトピモル氏（チェンマイ大学助教授）も数ヶ月間，高エネルギー加速器研究機構に滞在した．改造の基本方針は，SORTECの電磁石を全て使用し，不足分は新たに製作するが，磁石の追加はあまり多くしないことである．電子エネルギー1 GeVのSORTECのストレージリングは，45度偏向磁石1台と四極磁石2台からなるユニットセル8組で構成されていた．新しいストレージリングは，エミッタンスを低減して長い直線部を設けるためダブルベンドアクロマートと呼ばれる高輝度光源用の磁石配列を採用した．45度偏向磁石2台と四極磁石7台でユニットセルを構成し，挿入光源を設置するため長さ7 mの直線部を設ける．ストレージリングは，このユニットセル4組で構成され，周長は81.3 mで長さ7 mの長直線部が4本ある．新しい光源加速器システムであるサイアム・フォトン・ソース（Siam Photon Source）を**図1**に，主要なパラメータを**表1**に示す．ストレージリングのエネルギーは1 GeVであるが，偏向磁石電源を更新

表1 サイアム・フォトン・ソースの主要諸元

Storage ring	
Energy	1.0 GeV
Circumference	81.3 m
Magnet lattice	Double Bend Achromat
Superperiodicity	4
Long straight sections	7 m×4
Betatron tunes; ν_x, ν_y	4.71, 2.78
Momentum compaction factor	0.0241
Natural emittance $\varepsilon_x^{(0)}$	72 πnm·rad
Natural chromaticities; ξ_x, ξ_y	−7.64, −6.73
RF frequency	118 MHz
RF voltage	120 kV
Harmonic number	32
Booster synchrotron	
Maximum energy	1 GeV
Circumference	43.19 m
Magnet lattice	FODO
Betatron tunes; ν_x, ν_y	2.25, 1.25
RF frequency	118 MHz
RF voltage	60 kV
Harmonic number	17
Linac	
Maximum energy	40 MeV
RF frequency	2.856 GHz

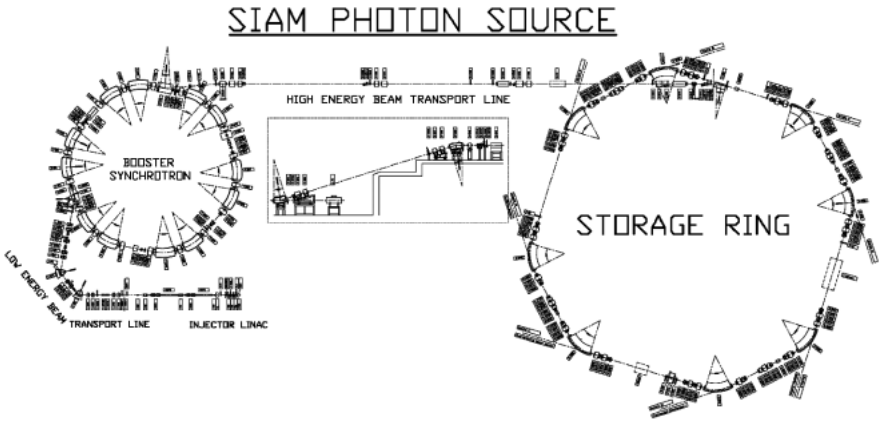

図1 放射光光源加速器システム（サイアム・フォトン・ソース）

すれば入射後の加速により 1.2 GeV で運転できるように準備した．実際に偏向磁石用電源を大容量のものに交換して 2005 年より 1.2 GeV で運転している．運転モードに関しては，長い直線部のエネルギー分散関数をゼロではなく正の値にして低エミッタンスモードでの運転を行なっているが，ここでは設計当初の値を示す．

SORTEC では，ストレージリングと入射器が同じ高さの床面に設置されていた．シンクロトロンは上から見て時計回り，ストレージリングは反時計回りで，ビームはストレージリングの外側から入射した．サイアム・フォトン加速器システムは，ストレージリングを地上面に設置し，シンクロトロンを，地下１階に設ける．シンクロトロンで加速した電子ビームを，地下トンネルを通してストレージリングの下に運び，地表まで立上げてストレージリング内側から入射する．この配置によりストレージリングの全周にビームラインを設けることが出来る．

4.　実験棟の建設

タイに放射光研究所を建設する計画の初期段階では，加速器システムを既存の建物であるスラパット 3 内に設置すると考えられていたが，建物床の最大荷重とその安定性，ならびに放射線遮蔽の観点から現実的でないことが理解された．そこで，NSRC のサイアム・フォトン・ラボラトリとして新しい建物を，スラパット 3 の横に建築することになった．加速器用建物を設計した経験が豊富な日建設計が基本設計を担当して，その基本設計をもとに詳細設計を行なったのがタイのキーン（KEEN）という設計会社である．これらの設計により入札を行い建物を建築するゼネコンを選定した．

1997 年１月末に建物の基本設計に関する日建設計の打合せを東京で開始した．石井武比古氏がしばしばタイから日本に出張して，山川達也氏と筆者が加わり，日建設計と行なった打合せでは，加速器の配置やビームラインを設置する実験室に関する要求を説明した．又，この打合せに第 2 期計画を担当する三菱電機と東芝の技術者も参加して，加速器の設置用基礎や，受電設備，接地線，冷却水などに関する要求を述べた．設計の段階で画いた NSRC 建物の外観を**図 2** に示す．建物の構造は，ストレージリングとビームラインを納める部分は円形の地上１階建である．この円形部に接する地上１階，地下１階の方形建物の地下１階にシンクロトロンと電子ライナックを設置する．建物全体は前方後円形で，周りの建物や地表の色

図 2　NSRC 建物の外観図
手前の建物が実験棟（サイアム・フォトン・ラボラトリ）で奥の建物がスラパット 3

と調和するように茶色とする．円形部分の屋根の中心に，帽子形の突起を置くことでタイの建物らしくなる．方形部１階には，全体の受電設備や冷却水設備，シンクロトロン用電源などを置く．地下１階のシンクロトロン室からストレージリング内側の地下まで高エネルギービーム輸送路を設置する地下トンネルが真直ぐに伸びる．ストレージリングのまわりに高さ 3 m で厚さ 0.5 m のコンクリート製遮蔽壁を設ける．

建物の基本設計の際に問題になったのが，建物と加速器の基礎部であり，設備関係では受電設備と冷却水である．建物基礎に関しては，ストレージリング基盤に十分なパイルを打つことが指定されたが，具体的な仕様に関しては，現地のボーリング調査を行なう必要があるので，キーンによる詳細設計の時に調整することにした．タイの電力事情が懸念されるので，受電設備に関しては，日本の企業に受け持ってもらいたいという希望があり具体的な検討作業を東芝と行なったが，価格の点で折合いが難しく，最終的には実現しなかった．加速器システム用純水冷却水に関しては，タイに子会社を持つ専門企業のオルガノに設計と建設を依頼することにした．現地の上水の質が懸念されたために，NSRC が使用する水のサンプルを採取して，組成分析を行ない，それに基づき純水製造装置を設計した．

日建設計による基本設計は，開始半年後の 1997 年 6 月 2 日に終了し，引続きキーンにより詳細設計が始められた．詳細設計の段階でも，受電配電設備と加速器用冷却水設備に関してキーンとの打合せの会合をタイでたびたび持った．この詳細設計を使い，建設会社であるゼネコンの入札を行なった．タイのゼネコンは，加速器用建物を建設した経験が無いので，日系のゼネコンに依頼したかったが，入札の結果，1998 年 1 月 5 日に，パワーライン・エンジニアリングを受

電・配電設備の下請けにしたタノヴォンというタイのゼネコンに決まった．落札価格は2億1千970万バーツ（現在の為替レートで約6億3千500万円）である．

実験棟の建設は1998年2月28日の鍬入れ式で始まった．式典には，科学技術環境省（当時）の副大臣や，同省の事務次官を理事長とするNSRCの理事たちや，地元の政治家や有力者も参加した盛大なものであった．筆者も参加する機会を得たが，タイの式典では，仏教のお坊さんが7〜8人上席に並んでお経を上げる．これに加えてバラモン教の神主さん1人が活躍するのを興味深く見物した．この様にして建設が始まった建物は，一部の設備を除き1999年末に完成した．

建物に付帯する設備である電気と水，空調に関して多くの問題が発生した．電気設備は前述のようにパワーライン・エンジニアリングが担当したが，この会社による基本設計は満足できる水準になく，代わりに東芝が以前作成した受電・配電設備の単線結線図を使用することにした．また，武藤正文氏（高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設）に電気設備の助言をお願いした．加速器用冷却水システムに関しては，不良計器の使用や，不適切な配管路，バルブや圧力計および流量計の不足，漏水，ステンレス配管内に錆状の粉末発生などが発見された．これら冷却水システムの問題解決に当たったのは，1999年5月から2001年3月まで光源加速器システムの建設に携わった菅原真澄氏（東北大学名誉教授）である．NSRCの技術者が床に黒い水が落ちているのを複数箇所で発見して，配管の溶接が適切に行なわれなかったことがわかった．最終的には，ステンレス配管の溶接を全てやり直すことで，冷却水システムの問題が解決したのは2000年春である．設置された空調機器に関しては，冷房装置のみで暖房機能を持たないため，外気温度が低い場合には，室温を一定に保てないという問題があった．

受電設備に関しても不可解なことが起こった．シンクロトロンを運転する時に外部のAC電源ラインに発生する悪影響を緩和するために高速無効電力補償装置（Hi-QC）と高調波フィルターをSORTECから持ってきて組み立てたことを後に述べる．これらの装置を建物の受電設備につなぐと，5次の高調波が非常に大きく，高調波フィルターの容量を超えて安全装置により停止する現象が2001年3月頃に起きた．この高調波によりスラナリ工科大学の電子顕微鏡センターに悪影響が出るという苦情を聞いた．2001年7月には高速無効電力補償装置が故障して抵抗が異常に発熱する現象が起きた．2001年8月9日に受電設備の高電圧大容量フューズ2本が爆発して壊れ，その下流についている受電設備全体の無効電力補償装置のコンデンサーも壊れる事故も起きた．これら不可解な故障や事故の原因は，受電設備に不正なフューズを使用したことによることが後日判明した．8月9日のフューズ破損は2回目であり，以前に同様のことが起きたが報告せずにフューズを交換した．その時の電気的衝撃で高速無効電力補償装置が壊れたものと思われる．不正フューズは偽の規格が印刷されており，実際の容量は使用値程度であった．この様な状況が続くと，フューズは切れずに温度が上がる．フューズ内部のガスが熱せられて圧力が上がりフューズが爆発的に破壊されたのが原因であった．5次の高調波に関しても，1次冷却水用ポンプが原因であり，電子顕微鏡センターへの悪影響も誤りで有ることが分った．

5. 第2期計画―光源加速器の再組立とビームラインの新設―（1997年1月〜2000年3月）

第2期計画は，第1期計画でSORTEC光源加速器システムをタイに搬送した直後の1997年1月から始まった．加速器の再組立に際しては，SORTEC部品は全て使用したかったが，ストレージリングの改造に伴い，その真空チェンバーを更新することにした．計算機制御系に関しては，ハードウエアが時代遅れであることに加えて，制御用ソフトウエアも他の計算機システムに移植できるものではなかったので，全体を新しい物に置き換える．ストレージリングと入射用シンクロトロンの位置関係が変わるので，シンクロトロンからストレージリングへのビーム輸送路である高エネルギービーム輸送路（HBT）を新たに作り直す．この様な基本方針で加速器の再組立の検討を始めた．

この時期，石井武比古氏は，放射光施設を建設する5カ年計画を策定して，概算要求のためにタイ国政府に提出する準備を進めていた．1997年2月24日から1ヶ月間，ナコーン・ラチャシーマで，シンクロトロン放射の利用に関する地域スクール（Regional School on Applications of Synchrotron Radiation）が開催された．その間に，山川達也氏と筆者が1週間ほどタイを訪問し，会場のホテルで，5カ年計画の加速器部分の検討を行なった．この計画書は5月末に理事会に提出され，6月17日に理事会で承認された．

タイの学術行政担当者へサイアム・フォトン計画を理解し援助してもらうための広報活動の一環として，日本から運んだ光源加速器システムのうち電子ライナ

ックをスラパット3内の1室に組立てて展示することになり，三菱電機が1997年4月にこの作業を始めた．

石井武比古氏がタイに赴任した頃からタイ放射光計画の関係者の間で深刻な争いが起きたと聞いている．その結果，NSRC所長のビルン・サヤカニット氏（チュラロンコン大学教授）が1997年5月1日に退任した．タイの放射光計画を引続き遂行するために，石井武比古氏が総括学術専門官に就任し，ビラポン・パイアスワン氏が所長代理になった．また，同年5月末にイッティー・リッタポーン氏も科学技術省傘下の別の研究所に転勤してNSRCを去った．これで計画の当初からタイ側の主要メンバーであった両名に代わり，タイ放射光計画の学術面を石井武比古氏が担当し，ビラポン・パイアスワン氏は管理・運営面を担当して計画を遂行することになった．

1997年7月にタイの通貨・経済危機が発生して9月には政府予算のカットが始まった．通貨危機前には最高で1バーツ5円程度であったバーツが半分の2円台に下落した．第2期計画の多くを日本企業に発注しようとしていたので，必要な経費が2倍になることを意味する．しかし，タイの関係者がこの計画を遂行しようという意思は，この経済危機のために変わることは無かったが，計画の実行に大幅な遅れを生じた．1997年10月から始まるタイの新会計年度に5カ年計画に基づく予算要求を出す予定であったものを事務的な手違いにより予算要求の提出が1年遅れたことも計画の遅れを拡大した．

スラパット3内部に加速器部品を保管している間にもさまざまなことが起きた．1997年11月には保管機器の周りのフェンスをねずみが飛び越えているのが発見されたし，シロアリによる被害も発生した．三菱電機のライナック用電源の木箱が，シロアリに食い荒らされてぼろぼろになったし，東芝の磁石の梱包内部にねずみが巣を作っているのが発見された．幸いにも両者とも内部の機器は損傷を受けなかった．1997年12月初旬には，スラパット3の壁に大音響と共に亀裂が入った．長大な建物の床に大きな荷重がかかり，建物が変形して3箇所に設けられたエクスパンジョン・ジョイントの一つが破損したものである．同様の現象はこの後2回発生したが，この部分は建物の安全装置であるので実害は無かった．

加速器システムの再組立に必要な技術的検討と，価格や契約条件などの交渉は，石井武比古氏が1〜3ヶ月に一度タイから出張して日本で行なわれた．ストレージリングとライナック，低エネルギービーム輸送路に関しては，東京丸の内にある三菱電機本社や後述の三菱商事本社で，NSRC側メンバーである石井氏と，山川氏，筆者が参加して行なわれた．三菱電機は，営業担当の原田俊治氏と技術担当の幸丸正樹氏が中心メンバーである．シンクロトロンと高エネルギービーム輸送路に関しては，当初東京有楽町の，後に浜松町に移転した東芝本社で行なった．東芝では，営業が今井洋一氏，南波成直氏，緑川秀俊氏と順次交代で担当する一方，技術は平田寛氏が担当した．再組立の契約交渉は，東京丸の内の三菱商事本社で，NSRC側メンバーに，三菱電機と東芝が参加して行なった．三菱商事の担当者は伊東宏一氏であった．見積費用が巨額であったので再組立の契約を解体と輸送の第1期と再組立の第2期に分割したのであるから，第2期計画に関する最も重要な交渉点は価格である．SORTEC光源加速器は，解体して搬出する約1年前の1995年末までは稼動していたが，ストレージリング偏向磁石用電源が故障したために運転を停止したと聞いた．故障の原因は，電源内で冷却水が漏れてトランスにかかり，トランスが絶縁不良になったためである．荷物をタイに搬送する前にこの電源の修理を電源メーカーの東京電子に依頼した．従って我々の認識は，光源加速器をそのまま移設すれば基本的に動作するというものであった．ストレージリングと高エネルギービーム輸送路を多少変更するとはいえ新規製作と同様の見積になるのは不可解であった．その後の価格交渉でもその差はなかなか埋まらずに，1999年の春まで交渉は続いた．一時は三菱電機や東芝に再組立を依頼することをあきらめて，他社を探す，またはNSRC独自で工事をする可能性も検討した．再組立費用が高くなるのは，不確定要素が多い海外の工事であることや，同じく不確定性要素が多い古い加速器部品を組み立てるためであると考えた．そこで全てのリスクはNSRCが負うので，再組立と組上げた機器単体を試験するのに必要な人×日を見積もり，それに単価をかけて価格を決めるという方式を採用した．単体試験に関しても，機器を壊さないように最大出力の2割で行なうということまで要求された．再組立に必要な費用の他に，ストレージリングの改造に伴い，四極磁石を12台とその電源2台，八極磁石8台とその電源1台，水平方向ステアリング磁石とその電源（極性切替器付）16組，鉛直方向ステアリング磁石とその電源（極性切替器付）4組，及びそれらの設置用架台を三菱電機が新たに製作する．入射器とストレージリングの位置が変更されたために，高エネルギービーム輸送路用に鉛直方向偏向磁石とその電源2組，水

平方向偏向磁石とその電源2組，真空システム1式を東芝が製作する．これらの新規部品を含めた費用として，東芝が2億390万円，三菱電機は3億9500万円で合意した．

SORTECの機器が使用出来ないので新たに製作する真空システムと計算機制御システムに関しては，それぞれ有力な2社と技術的と価格的な観点から交渉した．その結果，ストレージリング真空システムは，石川島播磨重工に1億3500万円で，計算機制御システムは東芝に1億5200万円で発注した．石川島播磨重工の技術担当は西殿敏朗氏であり，東芝の制御技術担当は前田一尚氏である．この他にストレージリングのボタン型ビーム位置モニタがSORTECより増えたために新しい制御回路をフランスのベルゴーツから購入する．SORTECストレージリングRFの制御機器は，半分手動制御であったので，遠隔操作盤の替わりに新たに計算機用インターフェースを設ける．これに加えてストレージリング鉛直ステアリング磁石用電源は単極性で極性切替器も無かったので，新たに極性切替器を設ける．これらの機器を製造した東京電子に追加と改造を依頼した．更に，加速器の周辺機器の一つである放射線モニターシステムの設置は東芝に依頼した．

第2期計画の準備を進めている1998年初めに，放射光計画に対する反対運動がタイで起こった．計画を継続するか中止するかタイの教育研究機関の代表者を集めて意見を聴取する大規模な会議が，1998年2月27日にバンコクの科学技術省で開催された．部外者の参加は禁止されていたが，石井武比古氏の指示で筆者も出席した．タイ語での議論であったので全く内容を理解できなかったが，会議後に石井武比古氏が対面した反対運動の指導者はビルン・サヤカニット前NSRC所長であった．この会議の翌日が前述のようにサイアム・フォトン・ラボラトリ実験棟の鍬入れ式であったが，この式典に科学技術省の副大臣が出席することにより計画を続行することが内外に示された．

再組立の金額に関して各社との基本的な合意は1999年春までには得られたので，その後本格的に技術的な検討に入った．三菱電機と東芝が関係する第2期計画の契約は三菱商事が担当していたが，最終的な契約を結ぶ1999年末になり，契約条件について三菱電機と三菱商事の合意が不可能な状態であることが判明した．そのため三菱電機と東芝が行なう再組立に関する契約担当が2000年始めに三菱商事から丸紅に変更された．

第2期計画のなかで，石川島播磨重工が担当したストレージリング用真空チェンバーが最初に完成して，1999年9月初めに横浜磯子の工場で検収後，すぐタイに送り出した．三菱電機が新たに受注したストレージリング用の四極磁石と六極磁石は，フランスのシグマファイ社が製造したが，2000年6月末に四極磁石の磁極位置の精度が悪く，仕様を満たさないことが分った．四極磁石ヨークの精度が悪いのが原因であったので，ヨークを再切削して問題は解決したが，四極磁石の高さが設計値より1 mm低くなった．三菱電機が受注した新規の磁石検収は2000年9月初めに三菱電機神戸製作所で行い，引続きその電源の検収を東京電子の佐野工場で行なった．その翌日から東芝が担当した計算機制御システムの検収を東芝府中工場で行なった．この計画の主要な目的の一つが人材育成であるので，その一環として，NSRCの若い技術者2名が計算機制御システムを製作した東芝府中工場で数ヶ月間，ソフトウエアの作製に参加することにより教育訓練を受けた．2000年10月初旬には，東芝が担当した高エネルギービーム輸送路用新規電磁石の工場検収を東芝京浜事業所で行なった．その際，偏向磁石のコイルの一つが内部で短絡していることが分り作り直すことになった．

6. 光源加速器システムの建設（1999年12月～2001年3月）

加速器システムの設置と組立は実験棟が完成した1999年末から始まる．加速器の設置・調整で大きな役割を果した菅原真澄氏（東北大学名誉教授）が，タイで活躍を始めたのはこれに先立つ1999年5月である．

1999年12月3日にタイのチュラポン第4王女が竣工したNSRCの実験棟を視察することになった．本格的な再組立に先立つ先行工事として，NSRCとタイ辰和工業は，1999年11月15日から25日まで，三菱電機と東芝の協力を得て加速器電磁石の一部を設置した．シンクロトロン室では，シンクロトロンの偏向磁石と四極磁石，低エネルギービーム輸送路の電磁石を粗い位置精度で置き，ストレージリング室では偏向磁石2台と，四極磁石と六極磁石を含むSORTECの直線部を一つ展示した．チュラポン王女は，実験棟の視察でストレージリング室はご覧になったが，地下のシンクロトロン室へは下りずにテレビ中継で済まされたと聞いた．

本格的な再組立は2000年3月23日に始まった．三菱電機の依頼で測量会社であるパスコが建物内部を測量して加速器設置用の基準点をシンクロトロン室か

ら高エネルギービーム輸送路のトンネル，ストレージリング室の各所に設けた．この作業に引続き東芝が加速器の組立作業を始める予定であったが，タイの就労ビザと，再組立作業にも必要な日本政府の輸出許可を期限内にとれずに，作業開始が5月26日まで遅れた．

タイで加速器の組立作業を行なう企業の体制について説明する．NSRCとの契約や機器の輸送，ビザや輸出許可取得などの業務を担当するのが丸紅である．この下に，加速器の技術面を担当する東芝と三菱電機が入る．両社に協力して現地での据付を担当するのがいわゆるプラント建設である．東芝に関しては東芝プラント建設のタイ法人であるトスプラントが，三菱電機の場合には，社内のプラント部門が担当した．これらのプラント企業・部門の実働部隊になり，機器の設置やケーブル配線等の作業を行なうのは，タイの企業である辰和工業（タイ）である．

東芝が作業を開始してまもなくの6月初旬に，シンクロトロンとライナックの位置関係がSORTECのそれと異なることが分かった．原因は，筆者のミスで，建物を設計する時に日建設計に渡した加速器システムの寸法を誤ったことによる．幸いにも，菅原氏を初めとする関係者による検討で，ライナックの位置を横方向に7 mm移動して，低エネルギービーム輸送路を70 cm延長することにより解決できることが分った．

2000年5月26日に開始したシンクロトロンの再組立は6月25日に一応終了して，引続き電磁石の精密アラインメントを行なった．7月18日には，シンクロトロン真空チェンバーのリーク試験中に，ベローズが破損する事故が起きたが，深刻な物ではなかった．シンクロトロンを運転するとACラインに無効電力と高次高調波が発生するので，これらを補正するために高速無効電力補償装置（Hi-QC）と高調波フィルターを設置する．これらの装置はシンクロトロンと密接な関係にあるが，SORTECの受電設備を担当した日立がニチコンに作らせたものであった．2000年7月末にNSRCは，タイ辰和工業に依頼して装置を設置した後，検査と試験運転時の立会いをニチコンに依頼した．シンクロトロンとストレージリングのパルス磁石電源は，ニチコン製であるので，同時期にこの試験検査をニチコンに頼んだ．東芝によるシンクロトロンの組立作業と単体試験は2000年8月2日に終了した．

前述のように2000年秋には第2期工事で設置する新規製造機器が完成して日本で工場検収が行なわれていた．2000年9月14日に三菱電機の加速器組立の責任者である豊田秀男氏がNSRCに着任して，三菱電機担当部分の組立作業が始まった．9月25日にスラパット3内部に展示してあるライナックの解体とシンクロトロン室への移設を開始した．組立作業の完了後，ライナックの真空立上を10月9日に始め，電気試験を11月2日から行なった．

ライナックの組立に引続き，ストレージリングの組立は2000年10月11日に始まった．ストレージリング直線部に四極磁石などを設置する架台を新たに製作したが，搬送した荷物を開梱した所，これらの架台がひどく錆びついているのが分った．輸出用梱包が不十分で日本から船便で輸送中に錆びたものと考えられる．これらの架台は，現地で塗装をやり直し修理した．10月末に，ストレージリングの鉛直方向のステアリング磁石を取付けていたところ，真空ダクトにぶつかることが分り，スラナリ工科大学の工場で磁極を削って拡げることで問題を解決した．ストレージリングの電磁石を全て設置した後，2000年11月28日からパスコが電磁石位置の精密測量と精密設置の作業を始めた．

1999年からNSRCに保管していた新しいストレージリング用真空チェンバーを2000年11月6日に開梱した時，アルミ合金製真空チェンバーが折れて破損しているのを発見した．12月4日に製造を担当した石川島播磨重工の検査員が到着してリークテストを行なったところ，目視で確認できた4ヶ所に加えて新たに2ヶ所のリークを見つけ，全部で6ヶ所に問題が有ることが分った．これら全ては，ボタン型ビーム位置モニタ部と通常のビームダクトの溶接部であった．12月14日には真空チェンバーの修理要員が溶接機と共にNSRCに到着して溶接による修理を行ない12月21日に終了した．この頃日本では，三菱電機の技術担当である幸丸正樹氏が転任して，飯田利昭氏が後を引き継いだ．

2001年1月初めに三菱電機の試験要員がライナックの高電圧運転試験を始めた．1月19日から29日までハイパワー試験を行なった．石川島播磨重工の西殿敏朗氏の指示で三菱電機がストレージリングの真空チェンバーの組上げ作業を行なった．真空システムの設置が完了してリーク試験を始めたところ，再溶接箇所から再びリークしているのが1月29日に見つかった．2月5日の週に石川島播磨重工の修理要員がNSRCに到着して再溶接を行ない，2月8日に修理が終了した．三菱電機が製作したタイミングシステムが動作しないことがこの日に発見された．これは後日，深刻な問題に発展した．この頃，ストレージリングのRF空

洞チューナーのベローに真空漏れがあるのが見つかり日本に送り返して修理することにした．2月14日から3月2日までの間，三菱電機の依頼により東京電子が電磁石用直流電源とRFパワーアンプの動作試験を行なった．これに引続き，東京電子は，NSRCの依頼によりRF計算機用インターフェースの立上調整を行なった．

パスコがストレージリング電磁石の精密測量を始める少し前，2000年11月15日に東芝は，制御系と，放射線監視装置，復元工事の残存案件である高エネルギービーム輸送路の設置工事を始めた．2001年2月1日に，計算機制御系の検査員が現地に入り，2月8日には高エネルギービーム輸送路の真空チェンバーの組立を開始した．1年前に精密設置をしたシンクロトロン磁石の位置を再測量したところ，電磁石が大きく動いているのが分った．ストレージリング電磁石の位置も測定すると，2000年11月にパスコが精密設置した位置からかなりずれていた．

NSRCで加速器建設に中心的な役割を果した菅原真澄氏は，2001年3月7日にNSRCを辞めて帰国した．同じ頃，三菱電機と東芝の組立部隊が日本に引き上げた．東芝の制御部隊も2001年3月27日に一時的に帰国した．菅原真澄氏が帰国した後，2001年3月16日から4月10日まで石川島播磨重工の西殿敏朗氏がNSRCの職員を指導してストレージリング真空システムのベーキング作業と真空立上を行なった．このベーキング作業に山川達也氏も参加した．2001年6月3日に三菱電機の豊田秀男氏が帰国してNSRCでの三菱電機の活動は終了した．

建設の段階で明らかになった問題点は，ストレージリング用真空ダクト溶接部と，三菱電機担当のタイミングシステム，ストレージリングとシンクロトロンの磁石の動きである．

7. 光源加速器の立上（2001年3月～1002年12月）

菅原真澄氏の後を引き継いだのは小山田正幸氏（元東北大学教授，NSRC技術顧問）で，2001年4月2日から2002年4月23日までNSRCで加速器の立上に従事した．2001年3月には科学技術省からNSRCに分配した予算を返却せよとの要求があった．5月には，10月に始まる新年度のNSRC新規要求予算はゼロ査定を受け，外国製品輸入禁止令が出ていた．これは2001年の選挙で誕生したタクシン新政権の選挙公約に基づく新しい予算配分が実施された結果であると聞いている．

2001年2月8日に動作不良が発覚した三菱電機のタイミングシステムは，ライナックとシンクトロンに運転開始のトリガー信号を供給すると共に，電子ビームをストレージリングに入射する際にストレージリングのセプタム磁石や，キッカー磁石3台のパルス電源にトリガー信号を供給する装置である．このタイミングシステムからトリガー信号を受け取るシンクロトロンとライナックは，それぞれ独自の運転用タイミングシステムを持つが，これらのタイミングシステムは正常に動作した．三菱電機のタイミングシステムに使用されたプログラマブル・ロジック・コントローラー（PLC）の保持用電池が，SORTECの運転を止めた1995年冬から約5年間の間に放電して制御用プログラムが失われたことが原因と考えられた．3月の下旬に三菱電機から入手した電池と保管されていたソフトを入れたがシステムは動作しなかった．三菱電機に修理を依頼すると，修理費は最低1000万円かかり日本に送り返す必要があるとの回答であった．その後，NSRCの技術者による調査で，2枚の基板でトランジスタの破損が見つかったこと，PLCのCPUが動作しないことや，基板の差込不良などの不具合が見つかった．この様な状況であるので，三菱電機のタイミングシステムをあきらめて代替品を探すことにしたが，新しいタイミング系の見積をとっても，NSRCが用意できる金額をはるかに超えていた．そこで，スプリング8の川島祥孝氏（高輝度光科学財団）に指導・協力してもらい，NIMモジュールやデジタルディレイなど市販の部品を組み合わせて新しいタイミング系を短時間に構築することにした．この試みはうまく行き，2001年7月には加速器システムを動かすタイミング系が完成した．

もう一つの問題は実験棟の床の問題である．2000年6月にシンクロトロン磁石を精密設置した後，2000年12月にNSRCが測量したところ偏向磁石が1 mmから3 mm高くなっているのが発見されたし，2001年初めに東芝による測量でも確認できた．そこで2001年6月に東芝がシンクロトロン磁石の測量と精密設置をやり直した．シンクロトロンの中心部が盛り上がり，外側に向けて床が下がるという変形である．磁石の高さには，最大で5 mm程度の差があった．ストレージリングの床も同様であるが，この場合は全体が傾斜する動きである．後の調査で，これらの床の不安定性は，シンクロトロン室では不良パイルの使用，ストレージリング室ではパイル位置の不良とエクスパンジョン・ジョイントの不良が原因であろうとのことである．

加速器の立上運転は上流側から順次進めた．2001年8月10日にはライナックでビームを加速することに初めて成功した．2001年10月29日にシンクロトロンの立上を開始した．数日遅れて東芝の技術者2名が立上作業に加わった．最初はシンクロトロン電源を直流で運転してライナックから入射した電子ビームをシンクロトロンに捕獲することから始めて，エネルギーを次第に上げていく手順である．その際，RFノックアウト法によりシンクロトロンの動作点を測定した．入射時及びそれ以降の偏向磁石電流と，四極磁石電源2台の電流値の比から加速用電流パターンを決めて試験運転を行なうことを繰り返すと，少し加速したところですぐにビームが失われた．電磁石は飽和領域よりかなり低い磁束密度であるにもかかわらず，すぐに動作点が動いてビームが失われる．これを補正するためには，四極磁石の電流設定値を常識的な範囲を超えて変えなければならなかった．この不可解な現象の原因を追究したところ，シンクロトロン偏向磁石用電源の内部に取付けられた電流制御用DCCTの出力に，大きな直流バイアスが重なっていることが分った．最大エネルギー1 GeVに比べてビーム入射時のエネルギーは30～40 MeVと低いので，この様なゼロ点シフトがあると偏向磁石電源の見かけの出力電流値と電子エネルギーは比例しないため加速中にビームが失われる．このゼロ点シフトを考慮して電流パターンを作成したところ，2001年11月23日にシンクロトロンの1 GeV運転に成功した．シンクロトロン放射を観測するために小さなガラス窓がシンクロトロンの真空ダクトに取付けられている．筆者もその場に居合わせたが，テレビカメラをその窓に設置すると，電子ビームの加速に伴い，青白いシンクロトロン放射の可視部が点灯して白色の閃光に変化する様子を見ることが出来て極めて印象的であった．

2001年11月27日からストレージリングへの入射を開始した．これまでシンクロトロンの立上で中心的な役割を果した東芝の技術者2名は時間切れにより11月29日に帰国したので，その後はNSRC職員のみでストレージリングへのビーム入射を行なった．ストレージリングのモニター用ビームポートに光電子増倍管を取付けて，入射された電子ビームが発するシンクロトロン放射を見ながらストレージリングの四極磁石やステアリング磁石の電流を調整して，電子ビームの強度と周回時間を増やすように努めた．入射した電子ビームが途中で失われずにストレージリングを1周するには，水平方向ステアリング磁石の1台に強い電流を流さなければならなかった．また，鉛直方向のステアリング磁石の設定に非常に敏感であった．このことは，閉軌道が大きくずれていることを意味するが，ストレージリングの磁石が大きく動いているためであると考えていた．この様な微妙な調整をNSRCのラタカン・アピワトワジャ氏が行ない，2001年12月17日の夕刻に初めてストレージリングに電子ビームを貯蔵した．

8.　性能向上（2002年1月～2004年8月）

光源加速器システムの建設と立上に成功したことにより，所長代理であったビラポン・パイアスワン氏は2002年1月に所長に昇任した．2002年1月初めにストレージリングの貯蔵電流は2.5 mAでビーム寿命は30分であった．光源加速器システムの性能向上を図る時に障害になるのが入射器のビーム強度と安定性である．NSRCの依頼で，高エネルギー加速器研究機構の栗木雅夫氏は2002年1月に1ヶ月余りNSRCで動作が不安定なライナックの検査と調整をした．その結果，クライストロン駆動アンプの出力不足や，クライストロン冷却水の温度不安定，電子銃グリッドパルサーの不良など様々な問題が見つかった．これらのハードウエアの修理はその後おこなわれたが，4月2日の時点でのストレージリングの最大貯蔵電流は6 mAに過ぎなかった．この頃，ストレージリングの一部に放射線レベルの高い場所が見つかり，その部分でビームが失われると考えた．2002年4月23日に小山田正幸氏はNSRCでの任務が終わり帰国した．

この頃の加速器の状態に関する筆者の記憶は定かでない．ストレージリングへの入射に成功して以後，加速器の性能向上がはかばかしくないことは十分に意識していた．問題がストレージリング閉軌道の歪みであると思っていたが，ストレージリングの閉軌道補正を系統的に行なう能力は当時のNSRCに無かった．NSRCによる磁石高さの測定によりストレージリングの床面が大きく上下に動いていることが分っていたので，この問題を早急に解決する必要があると考えた．ストレージリングの精密測量をやり直すことにしたが，企業に頼むのではなくNSRC自ら行なうことにした．しかし，レーザートラッカーなどの精密測量装置も無ければ，それを使う技術も無かった．そこでスプリング8の協力を得て，NSRCのヌアンワン・サングアンサク氏がスプリング8に行き，松井佐久夫氏（高輝度光科学研究センター）に測量と精密位置調整のやり方を教わった．この様な準備の後に，レーザートラッカーをスプリング8から借り受けると共に，松井佐久夫氏にタイに来てもらい2002年6月

17日からストレージリング磁石の再アラインメントを行なった．また，ストレージリングの性能を向上させるには専門家が必要不可欠なことから，同じくスプリング8の佐々木茂樹氏（高輝度光科学研究センター）に指導を仰ぐことになった．佐々木氏は，2002年7月に大熊春夫氏（高輝度光科学研究センター）と共にNSRCを訪問して以降，1ヶ月程度の期間，何度もNSRCに来て指導した．

再アラインメントは2002年7月上旬までに終わり，ストレージリングの再立上を行なった．この作業はすぐに終わると予想したが，加速器の動作が不安定で再現性が無く2週間以上かかった．その原因は，設置工事の不良によりシンクロトロンの大型電源と，ストレージリングや高エネルギービーム輸送路の電源類とのアース分離が出来ておらず，シンクロトロン電源を励磁した時にノイズにより他の電源が誤動作したためである．再アラインメントの結果，ストレージリングの性能は次第に向上し，8月には最大電流が37 mA，9月には81 mAまで増加した．これを受けて2002年9月にはビームラインで光電子分光の実験が始まった．一方，この時期，バンプ磁石の誤動作で突然ストレージリングのビームが失なわれたり，電磁石電源が一時的に止まると入射できなくなる，ストレージリングに突然ビームが貯まらなくなるが，翌日には少しずつ回復するという現象があった．2002年11月4日に第3王女であるシリントン王女がNSRCを来訪した．

この当時，ストレージリングのビーム診断装置の整備が十分ではなかったので，佐々木茂樹氏がそれらを準備した．ストレージリングのビーム診断装置としては，放射光を利用して電子ビームの断面像を望遠鏡付テレビカメラで見る装置と，ベータトロン振動数測定用RFノックアウト装置，ボタン型ビーム位置モニタなどである．ベータトロン振動数の測定も，テレビ上のビーム形状の変化から共鳴周波数を求めるという状況であったし，閉軌道補正のためのプログラムも無い状況では，ビーム位置モニタの情報も十分役に立たなかった．筆者は，この頃の加速器の状態を正確には把握していなかったが，冬になると温度が下がるので，マシンがうまく動かないなどという信じられないような話や，ストレージリングのビームが動くのでビームラインでの実験に差し支えがあるという話も聞いた．後者に関しては，電源か制御系の故障または動作不良だと考えていた．ストレージリングの動作点は，設計では（Qx, Q）=（4.75, 2.75）付近であるが，経験的に見つけた動作点は（4.75, 3.25）付近であり，どうしても設計値付近に移動出来ないとのことであった．そこで，ストレージリングのベータトロン関数とエネルギー分散関数を測定して，状態を知る必要が有ったが，前述のようなベータトロン振動数測定方法では，再現性があり信頼性の高いデーターを常識的な時間で取ることが出来なかった．

2002年12月に佐々木茂樹氏の努力により，スペクトラムアナライザーとトラッキングジェネレーターを使った半自動のベータトロン振動数測定装置が完成して，ベータトロン関数が測定できるようになった．加速器システムの不安定さは続いて，2003年年明けの加速器立上でストレージリングにビームが貯まらない状態が続いた一方，2月24日には最大貯蔵電流153 mAに達して記録を更新した．筆者が2003年3月末に1週間NSRCを訪問した際，四極磁石4組に対して平均的なベータトロン関数を測定したが，特におかしな値ではなかった．時間的制約により全ての四極磁石位置でのベータトロン関数を測定することが出来なかった．

ライナックが不安定な状態が続いていたので栗木雅夫氏の後任として2002年12月からの大沢哲氏（高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設）に技術指導をお願いすることになった．電子銃を交換するための準備として，2003年1月に陰極アセンブリの準備を始めた．2003年6月にNSRCでライナックの診断をしてもらったところ，電子銃高圧タンクの放電場所がセラミック製の高圧ブッシング内部であることをつきとめた．この高圧ブッシングをNSRCで自作した物に交換した後では，放電によるノイズの発生とそれに伴う強度の揺らぎは無くなった．

2003年4月23日にはストレージリングの調子が極短に悪く貯蔵電流は1.5 mAで寿命は11分という状態に至った．4月25日に加速器の責任者であるラタカン氏よりストレージリング全周のベータトロン関数の測定値を送ってもらった．そのデーターを見ると，最大でも20 mを超えないはずの鉛直方向のベータトロン関数が50 mを超える部分がある．ここで初めて四極磁石がおかしいことを知った．ベータトロン関数が異常に大きい位置は，放射線レベルが高い場所と一致した．4月27日に，NSRCの技術者が，四極磁石のコイルから黒い液が漏れ出て固まっているのを2ヶ所で見つけた．5月2日には電流を流した時のコイル電圧降下を測定することにより，コイル絶縁不良が四極磁石3台に4ヶ所有ることが分った．5月25日に，タイの別所で仕事をしていた三菱電機の技術者がNSRCに来て四極磁石コイルの検査をした．その

結果はNSRCによる検査結果と一致して，問題があるコイルはSORTECから持ってきた16台の四極磁石のコイルからだけ見つかった．全部で64個あるコイルのうち，10個は不良であり，怪しいものを含めると20個はコイルの層間で短絡していることが分った．

コイル層間の短絡は，安定に起きるわけではなく，コイルに通電すると付いたり離れたりする．このような状態であるので，ビーム軌道が動く，ビーム入射が突然出来なくなる，再現性が無い，ビーム寿命が短い，入射の時に強い水平方向ステアリング磁石を使わないと最初の1回転もしない，温度に敏感であるなど観測された不可解な現象を全て説明できる．

コイル問題を解決するために2003年5月28日に神戸でNSRCと三菱電機の担当者が協議をした．コイル不具合の原因を知ることが対処方法を選ぶ際に重要である．SORTEC四極磁石は三菱電機が受注したものであるが製造は他社に任せた．その会社は，現在では磁石の製造をしておらず過去の資料は残っていないので詳細を知ることが出来ないというのが三菱電機の回答である．NSRCは，SORTEC四極磁石のコイル全てに製作当初からの問題があると考えたので，全て作り直して交換することに決めた．筆者の個人的な希望としては，原因が三菱電機にある以上，三菱電機にこの問題の解決に当たって欲しいと思ったが，見積価格が高く実現しなかった．NSRCの一部に，日本ではなくヨーロッパのメーカーに依頼するという動きがあった．スプリング8の佐々木茂樹氏の努力で，技術力が高く価格面でもヨーロッパのメーカーと競争できるテクノ電気という専門メーカーを見つけることが出来た．テクノ電気の見積価格は，ヨーロッパのメーカーのそれよりも少し高かったが，価格を下げてもらい，日本のメーカーに発注することが出来た．

64個全てのコイルを製作するには相当の時間がかかる．大きな問題があるコイルは4個であるので，テクノ電気手持ちのホローコンダクターを使い応急の品を作ってもらうことにした．コイルの断面は必要とされるものより少し小さいが，1 GeVでの当面の使用には問題を生じない．仕様と図面等が確定した2003年10月4日にテクノ電気に発注した4個のコイルは10月29日に完成して，航空便でタイに送った．

2003年11月13日にNSRCで実験棟完成披露式典が開催され，サイアム・フォトン・プロジェクトに関係したタイと日本の関係者が多数出席した．式典には，シリントン第3王女の臨席を仰ぎ，実験棟横の屋外に設置された会場で行なわれた．日本人の出席者は，石井武比古氏を初めとして，この計画に参加した山川達也氏，菅原真澄氏，小山田正幸氏，森多美子氏，柿崎明人氏（東京大学物性研究所），筆者の他，主な招待者として日本大使の時野谷敦氏，高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所所長の小間篤氏，高輝度光科学研究センター理事長の吉良　爽氏，企業の関係者などである．この計画に長期間参加したタイ人と日本人に対して，NSRC理事長名の感謝状がシリントン王女から授与された．

式典の翌日からコイルの交換作業を開始した．四極磁石は上下に2分割できるので，上側のコイルは容易に交換することが出来る．ストレージリングの真空を破らずに下側のコイルを交換するために，四極磁石の上半分を外した後，真空ダクトが邪魔しない位置まで下半分の磁石を下げてそれを横に引き出しコイルを交換した．精密測量用の機器が無いので磁石の位置調整には，トランシットを用いた．コイル交換後ストレージリングの再立上は容易に行なうことが出来て，状況が変わったことを実感した．2003年11月26日には，ストレージリングに100 mAのビームを蓄積することが出来，その時のビーム寿命は4時間である．コイル交換前は同じ電流での寿命は1.5時間であった．11月27日には最大蓄積電流が183 mAまで増えた．

問題の有ったコイルを交換後分解したところ，焦げ臭い強烈な匂いがした．コイル内部を見ると，黒いタール状の物質が絶縁材料として用いられているが固化していないことや，ホローコンダクターに透明なプラスチックシートが巻かれていたが，シートと黒い絶縁材料との親和性が全く無く，容易に解けたなど正常なコイルとはまったく異なるものであった．

2003年11月27日に本番用コイル64個の製作開始をテクノ電気に指示した．出来るだけ早く交換が出来るように，交換作業に必要な日数を考慮に入れて4回に分けて日本からタイに向け発送した．第1回目は2004年2月21日に発送し，第4回の最終便を3月末に発送した．他方，NSRC独自で精密アラインメントが出来るようにと購入を決めたレーザートラッカーが2003年12月に納入された．実際には少し遅れて2004年3月下旬にコイルの交換を始めた．前回と同様にストレージリングの真空を破ること無しに交換作業を行なった．全てのコイルの交換が終わった後5月中旬に精密アラインメントを始め，終了したのは6月末である．

四極磁石の精密アラインメントが終わった直後に，

ゲートバルブを開いた衝撃で再度真空ダクトが破損し，ストレージリング真空ダクトが一気圧になった．破損場所は以前の2回と同じボタン型ビーム位置モニタと通常の真空ダクトの溶接部分である．7月初めに石川島播磨重工の技術者がNSRCに到着して破損した部分を溶接して修理した．真空ダクトの破損はこれで3度目である．修理後に真空の立上を行い8月末に終了して，2004年9月に四極磁石コイル交換後のストレージリングを立上げた．

筆者は，この計画に参加した10年間にたびたびタイを訪問したが，最も長期間滞在できたのは，日本学術振興会特定国派遣研究者事業による出張である．1999年度から2004年度まで連続6回採用されて1回3週間のタイ訪問が可能になった．日本学術振興会とこの制度には大変に感謝しているが，残念なことに2004年度を最後にこの制度は廃止になった．その最後として，2004年9月6日から25日までNSRCを訪問した．9月6日は，再立上げ開始1週間後であったが，ストレージリングの貯蔵電流も100 mAに達していた．立上の当初，シンクロトロンで加速した電子ビームを高エネルギー輸送路に取り出すことが出来なかったので，ビーム取出用セプタム磁石の高さを調整してビームを取り出せるようにしたと聞いた．これは，シンクロトロン室の床の変形が未だ収まっていない事を意味する．ストレージリングに関しては，全コイル交換後にベータトロン関数とエネルギー分散関数を測定したところ計算値と良く一致して，ストレージリングが設計どおりに動いているのを確認した．このNSRC滞在中の2004年9月21日に石井武比古氏はタイに貢献した外国人に送られるディレクナポーン勲章を受章された．

9. その後（2004年9月～2005年6月）

2003年3月3日のNSRC理事会で，石井武比古氏のNSRCにおける定年が2004年10月26日と決まった．石井武比古氏の本務は，スラナリ工科大学の教授で，NSRCに出向している形を取っている．後日，大学との契約が2005年6月30日までであることが分り，NSRCの定年もそれに合わされた．石井武比古氏は，ストレージリング四極磁石コイルの交換以降は加速器関係の仕事から離れて，ビームラインでの実験研究とスラナリ工科大学の大学院生の教育に専念された．筆者は，2005年6月3日から22日までNSRCを訪問して加速器の状態を観察した．その際，シンクロトロンのビーム取出し用セプタム磁石のコイルが断線してビームが取出せなくなるという故障が起きた．NSRCの職員は，故障箇所を素早く発見して，折れた銅板を銀ロウ付けで直し，翌日には運転を再開した．光源加速器システムは，順調に稼動していたが，光源加速器として最高性能を実現するには今後なお一層の努力が必要であると思った．石井武比古氏は，予定どおり2005年6月29日にタイを離れて帰国した．

10. タイ放射光計画の10年を振り返って

筆者は，1996年春に石井武比古先生から電話を受けて以来，2005年6月末まで石井先生の下でタイの放射光計画を手伝ってきた．本務は大阪大学にあるために不十分な寄与しか出来なかったし，失敗も多々ある．石井武比古先生は，今振り返っても不可能と思われるような事業を成功に導かれた．筆者としては，その見識と，情熱，努力，忍耐に深い敬意を表したい．

加速器に関係して大きな影響を与えた事項は，ストレージリングの四極磁石コイル問題と，建物床の不安定性，ならびにストレージリングの真空チェンバーの事故であると思う．四極磁石コイルの黒いタール状の絶縁体は，ワニスかエポキシ樹脂か定かではないが，専門家の意見を聞くと，製作時に十分に温度を上げて硬化させるべき所を，熱処理の温度や時間が不十分で固まらなかった製造ミスと考えられる．建物の床の問題は，タイの設計事務所の手抜き設計と，ゼネコンの手抜き工事である．真空チェンバーに関しては，破損箇所が何時も同一であることから，その溶接部分に応力が集中するような構造にした設計上の問題があるように思う．溶接の強度に関して素人には分らないが，真空チェンバーに不必要な力を加えるという取扱上の問題も有ったのではないかと想像する．これら3つの問題が無かったら加速器の立上と性能向上はより早い時点で成し遂げられたと思うし，コイルと真空チェンバーの問題に関しては，日本企業や日本に対するタイの人々の信頼を損ねたのではないかと危惧する．

出来事の日付は，主に10年間にわたるタイ放射光計画に関する膨大な量の電子メールから取った．この文では，アンジュレータの建設に関しては触れなかった．関係者の内，氏名を紹介した人は，限られた数であり，これ以外に多くの日本人の参加と協力を得た．

参考文献

1） 石井武比古：加速器2巻1号（2005）54.
2） 石井武比古：固体物理 33巻11号（1998）65.
3） 岸本 健，椋木 健，小平政宣，淡路直樹，渡邊牧夫，荒木美次，阿刀田伸史，土舘裕幸，飯田利昭，来島裕子，淺井脩次：放射光 7巻1号（1994）15.