

## 話 題

## 中部シンクロトロン光利用施設（仮称）のコミッショニング

山本 尚人<sup>\*1,2</sup>・保坂 将人<sup>\*1,2</sup>・高見 清<sup>\*2</sup>・高野 琢<sup>\*1,2</sup>・真野 篤志<sup>\*1,2</sup>  
 森本 浩行<sup>\*2,1</sup>・高嶋 圭史<sup>\*1,2</sup>・加藤 政博<sup>\*3,1</sup>

## Beam Commissioning of Central Japan Synchrotron Radiation Facility

Naoto YAMAMOTO<sup>\*1,2</sup>, Masahito HOSAKA<sup>\*1,2</sup>, Kiyoshi TAKAMI<sup>\*2</sup>, Takumi TAKANO<sup>\*1,2</sup>, Atsushi MANO<sup>\*1,2</sup>  
 Hiroyuki MORIMOTO<sup>\*2,1</sup>, Yoshifumi TAKASHIMA<sup>\*1,2</sup> and Masahiro KATOH<sup>\*3,1</sup>

## Abstract

Construction of the Central Japan Synchrotron Radiation Facility has been completed in the Aichi area of Japan, and the beam commissioning was started in spring of 2012. Up to now, it is confirmed that the 1.2 GeV storage ring works with 300 mA Top-up mode. In this paper, the progress of beam commissioning and present status of accelerators are reported.

## 1. はじめに

中部シンクロトロン光利用施設（仮称）では、2009年12月25日に光源加速器一式を（株）東芝が落札し、2011年9月20日に装置搬入・据付が開始された。その後、2012年3月25日に線形加速器にて50 MeV電子ビームの生成に成功、2012年4月28日にブースターシンクロトロンでのフルエネルギー（1.2 GeV）加速に成功、2012年7月18日に光源リングへの初蓄積成功、2012年9月7日に300 mAの蓄積を達成、2012年10月15日に原子力安全技術センターによる放射線施設検査の合格通知を得るに至った。ビーム寿命（ $I \cdot \tau$ 積）は2012年11月で約1,800 mA.hrに達している。当初開設予定のビームラインは硬X線4本、軟X線1本、VUV（アンジュレータライン）1本の計6本であり、今年度中の供用開始に向け調整が進められている。

## 2. 施設の概要

中部シンクロトロン光利用施設（仮称）は、愛知県と公益財団法人 科学技術交流財団と大学連合（名大、名工大、豊橋技科大、豊田工大）による産・学・官連携により建設された<sup>1)</sup>。運営主体は公益財団法人 科学技術交流財団である。

名古屋大学では1991年からシンクロトロン光施設建設の検討<sup>2)</sup>を始め、2007年には「小型シンクロトロン光研究センター」を発足、2010年春には「シンクロトロン光研究センター」と名称を変更した。当センターは光源部門、ビームライン部門、計測・測定部門で構成され、本施設の建屋・設備の設計及び運営において学術と技術面を中心に指導的な役割を担うべく活動している。我々光源部門は特に加速器設計と立ち上げを担当しており、加速器詳細は我々がまとめたデザインレポート（基本設計）をもとに（株）東芝と協議を重ね決定した。

施設は愛知県瀬戸市と豊田市にまたがる地点に

\*1 名古屋大学シンクロトロン光研究センター 〒464-8603 名古屋市千種区不老町

Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan

\*2 公益財団法人科学技術交流財団 〒489-0965 愛知県瀬戸市南山口町250番3

Aichi Science and Technology Foundation, 250-3 Minamiyamaguchi-cho, Seto-shi, Aichi-ken 489-0965, Japan

\*3 分子科学研究所極端紫外光研究施設 〒444-8585 岡崎市明大寺町字西郷中38

UVSOR, Institute for Molecular Science, 38 Nishigo-naka, Myodaiji, Okazaki 444-8585, Japan

位置し, JR 名古屋駅からは市営地下鉄と東部丘陵線(リニモ)を乗り継いで約 50 分の距離となる。建屋はおよそ 81 m × 66 m の 2 階建てで 1 階に事務室, 加速器室, 実験ホールが, 2 階に運転制御室, 冷却水・圧縮ガスのユーティリティ設備, 会議室などが配置されている。

加速器パラメータを表 1 に示す。加速器は蓄積リング, ブースターシンクロトロン, 線形加速器で構成される(図 1)<sup>3)</sup>。加速器は建屋の建設コストを下げるために, 蓄積リングの円周内側に入射器全体を収める配置となった。ブースターシンクロトロンはトップアップ運転の早期の導入を目指して, フルエネルギーとなっている。蓄積リングの最大の特徴は, 偏向磁石の一部を超伝導とすることで, 比較的小型低エネルギーの加速器でありながら, 需要の多い硬 X 線を発生できる点である。ビームラインは最大で超伝導電磁石からの硬 X

線ライン 12 本, 常伝導電磁石からの軟 X 線ライン 16 本, 挿入光源 4 本の計 32 本を建設可能となっている。

### 3. 加速器建設

科学技術交流財団及び名大シンクロトロン光利用センターの限られた人員でこの規模の装置を個別発注で建設するのは, 装置間の取り合いの調整などで問題の発生する危険性が高いと判断し加速器装置を一式で発注, 請負業者は入札により 2009 年 12 月 25 日に (株) 東芝に決定した。これを受け翌 2010 年 1 月 13 日から (株) 東芝との光源整備 WG を開催し, 急ピッチで加速器の詳細検討を進めた。この WG は 2012 年 4 月 25 日まで計 69 回行われた。

中部シンクロトロン光利用施設では建設から運用までのスケジュールが短かったためビームライン建設と光源装置建設が並行して行われた。このため建屋の受電と空調器運転開始を待ち 2011 年 9 月 20 日に, (株) 東芝による光源装置の搬入・据付とパスコ(株)による基準点設置作業が同時に開始された。光源装置としては初めに蓄積リング高周波源用変圧整流器が搬入され, これに続き各種電源類と加速器コンポーネントが搬入・据付けられた。

据付時間短縮のため加速器コンポーネントは工場ですべてのセクション毎に組み立てられたうえで

表 1 加速器パラメータ

蓄積リング	
ビームエネルギー	1.2 GeV
周長	72 m
蓄積電流	300 mA 以上
自然エミッタンス	53 nmrاد
ベータトロンチューン	(4.72, 3.23)
RF 周波数	499.654 MHz
ハーモニクス数	120
エネルギー拡がり	$8.41 \times 10^{-4}$
ラティス構造	Triple Bend Cell
ブースターシンクロトロン	
最大ビームエネルギー	1.2 GeV
周長	48 m
自然エミッタンス	220 nmrاد
ベータトロンチューン	(2.75, 1.75)
RF 周波数	499.654 MHz
ハーモニクス数	80
加速繰り返し	単発 ~ 1 Hz
線形加速器	
ビームエネルギー	50 MeV 以上
加速電荷量	~ 1 nC
エミッタンス (90%)	100 $\pi$ .mm.mrad 以下
エネルギー拡がり	$\pm 0.5$ % 以下
RF 周波数	2,856 MHz
パルス幅	~ 1 ns

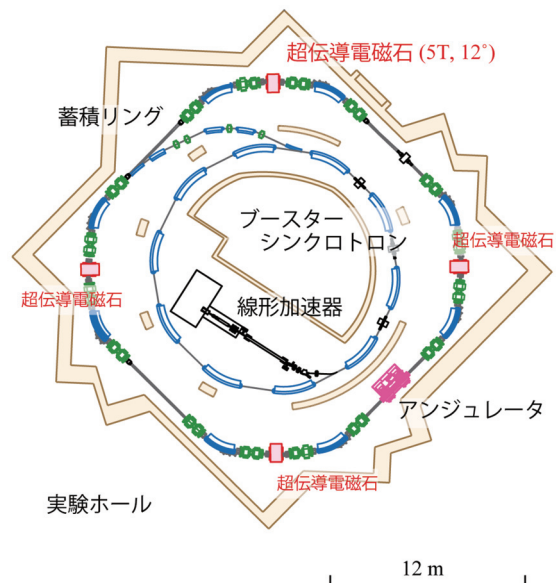


図 1 加速器概念図

運搬された。真空チャンバーの各セクションは工場において150度24時間のプリバークを施された後から現地に運搬され、据付後のベーキングは施されなかった<sup>4)</sup>。運搬が始まった当初は高周波空洞など一部装置の固定が不十分であり、運搬中にコンポーネントが架台からずれてしまったことがあり、肝を冷やすこともあった。

本施設ではコスト削減のためのクレーンの耐荷重が2.8トン以下に制限されていたため、一定のセクション毎に組み立てられた電磁石など多くの重量物は加速器室外周部に設けられた搬入口から搬入された。加速器室内は狭く既に冷却水等ユーティリティ配管が設置されていたこともあり、各コンポーネントがすれ違う空間はほぼゼロに等しく搬入・据付の様子はあたかもボトルシップを組み立てているようであった。

光源装置のビーム試験は2012年3月下旬から線形加速器を皮切りに開始された。ただし、いくつかの残作業もあり、最終的に蓄積リングの真空が立ち上がったのは2012年6月中旬であった。また、同じ時期にビームライン建設作業も並行して行われたため、この間、ビーム試験は実験ホールに夕日が差し込む18時頃より翌朝窓の外が明るくなるまで夜間を利用して行なった。

## 4. ビームコミッショニング

### 4.1 線形加速器のコミッショニング

線形加速器及び低エネルギービーム輸送路はシステムとしてAET(株)、アキュセラ(株)が詳細設計と立ち上げを請け負った<sup>5)</sup>。電子ビームは蓄積リングの高周波と同期したトリガーをもとに熱陰極型直流100kV電子銃をガンパルサーで駆動し、プリバンチャー、バンチャー管、そして1.5mのS-band定電界型レギュラー加速管2本を用い50MeVまで加速される。ガンパルサーはKentech社CPS1を用いており、パルス幅は560, 700, 1050psを選択できるようになっている。パルス伝送路は本電子銃のためにAET(株)が独自開発したものを利用している。

線形加速器の調整運転は2012年3月24日から開始し、その日のうちに50MeV電子ビームが確認された。その後、線形加速器は一応の仕様を満たす性能が確認されたが、現在は電子銃とヘルムホルツ電磁石の軸ずれ、ショット毎のエネルギー

不安定性、導波管部SF6のリークなどが問題として残されている。

### 4.2 ブースターシンクロトロンのコミッショニング

ブースターシンクロトロンはTop-up運転を可能とすべく、フルエネルギー入射可能な設計となっており、周長48mでラティスはFODOを基本とした構造とし自然エミッタンスは200nmradと比較的小さく抑えられている<sup>6)</sup>(図2)。入出射はそれぞれ1組のパルス電磁石とセプタム電磁石を用いシングルターンかつOn-Axisで行う。このため、入(出)射キッカーは160ns以下の早い立ち上がり(立下り)時間が必要とされる。特に出射キッカーにおいては名古屋大学提案の回路を採用し、サイクロン充電電圧17kV(当初提案は42kVであった!)において立ち上がり時間を130ns程度に抑えることに成功している。

本ブースターシンクロトロンの大きな特徴はコンパクトな真空・電磁石設計であり、最小のクリアランスは水平・垂直とも±10mmとなっている。この設計はブースターシンクロトロンの小型化と省電力化に大いに貢献したが、設計上の線形加速器からの入射効率を30%程度に制限している。また、真空コンダクタンスにおいても同様に思い切った設計となっており、真空ポンプから比較的遠いビームダクトでは $4 \times 10^{-5}$ Paの真空度でほぼ飽和している(排気開始から約9ヶ月後)。

ブースターシンクロトロンの入射調整は2012年4月18日から開始し、翌日にビーム周回、そ

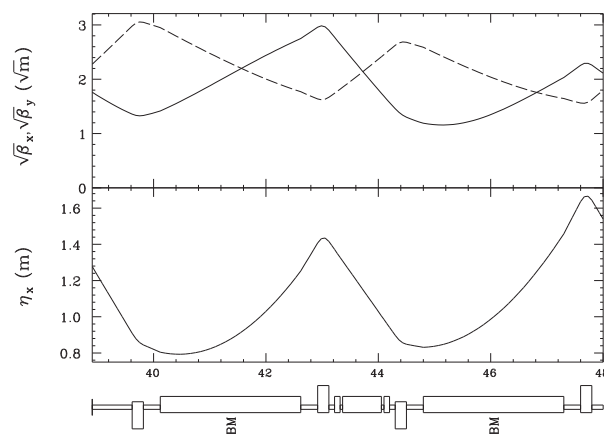


図2 ブースターシンクロトロン光学関数 (上記セルの5回対称となる)



の一週間後の4月27日に1.2 GeVまでの加速に成功した。後述するような問題点が明るみになってきたのはまさしくこの時期であった。

ブースターシンクロトロン調整はリングに設置された10組のビーム位置モニタをRF切替器とオシロスコープ(6 GHz, 20 GS/s)を用い各周回ごとの信号を直接観測して行った。オシロスコープで入射軌道と周回数をモニタしながら、低エネルギー輸送路及びブースターの各電磁石をコツコツ調整するという方法である。この結果、当初は30  $\mu$ A (約5 pC)と非常に少ない電流値であったが調整開始後の比較的早い段階でフルエネルギーまでのビーム加速を実現することができた。蓄積リングへのビーム入射を規定の時間内で終わるには、ブースターシンクロトロンから出射電流を1 mA (約160 pC)以上とする必要がある。これは初期に達成した加速電流値の30倍以上であり、かなり深刻な状態と思われた。

その後のマシンスタディにおいては、加速途中のチューンの調整(初期チューンは整数を横切るような状況であった)、入射軌道の調整、入射キッカーのジッター軽減を行い、現在では目標近くの1 mAまで加速電流値を改善することに成功している。

### 4.3 蓄積リングのビームコミッショニング

蓄積リングはエネルギー1.2 GeV 周長72 mであり、ラティスは偏向電磁石として超伝導1台と常伝導2台を組み合わせたトリプルベンドセルを基本構造とした4回対称となっている(図3)。運転モードは長直線部の分散関数を1.2 mとした低エミッタンスモードと、同じく0.7 mとした中エミッタンスモードを用意しており、それぞれ自然エミッタンスは53 nm radと92 nm radとなる。本蓄積リングの特徴は偏向電磁石に最大磁場強度5 Tの超伝導電磁石を用いたことであり、シンクロトロン光としての臨界エネルギーは4.8 keVとなる。4箇所の中直線部は約5 mの長さを持ち、高周波空洞や入射用キッカーと直線部を共有することで最大4つの挿入光源を設置することが可能となっている。

超伝導電磁石(図4)は名古屋大学の基本設計をもとに(株)東芝が詳細設計と製作を行った。超伝導電磁石は通常の電磁石と比べビーム軌道面に大きな磁場分布が存在し、これに伴った多極成

分が生じる。コミッショニングにおいて予測はされていたが、超伝導電磁石位置でのビーム軌道変化に応じて比較的大きな光学関数変化が観測された。このため初期のビーム調整においては目的の光学関数を得るまでにビーム軌道、チューン、分散関数、色収差の補正を何度も繰り返して行うことになった。超伝導電磁石の冷却は室温からの冷却時のみ液体窒素を使用し、通常は冷凍機のみで3.6 Kを維持している。工場での試験では約5日間で室温から3.6 Kまでの冷却を完了している。中部シンクロトロン光利用施設において停電時と長期シャットダウン時以外は超伝導電磁石を常時励磁しているが、現在まで3.6 Kで安定しておりクエンチ等問題となる現象は観測されていない。

蓄積リングのビーム調整は、真空立ち上がりを待ち2012年6月27日からブースターシンクロトロン調整作業の傍らに開始され、二日後には約200周(50  $\mu$ s)のビーム周回が確認された。こ

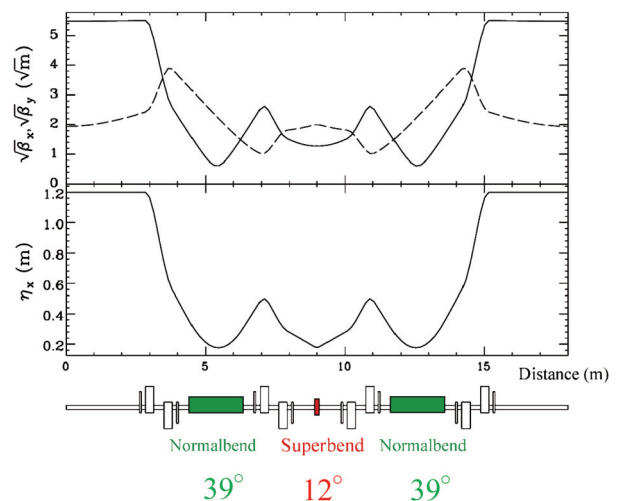


図3 蓄積リング光学関数

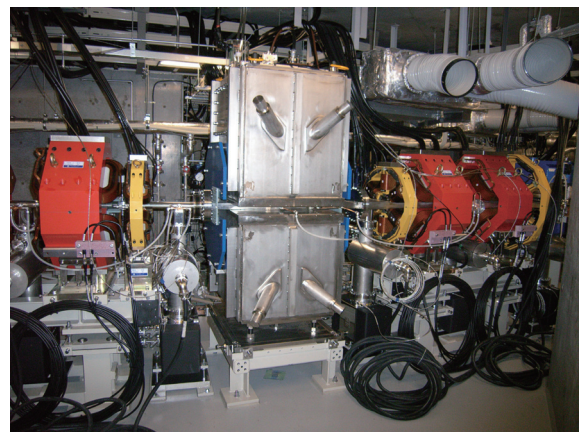


図4 超伝導電磁石の写真

の時点において、ブースターシンクロtronの加速電流値はおよそ  $60 \mu\text{A}$  (約  $10 \text{ pC}$ ) 程度であり、入射ビームの微小なビーム位置モニタ信号はオシロスコープを用いることで辛うじて観測することができた。蓄積リングの入射・蓄積調整はほぼ全般においてトップアップモードで行われた。

電子ビーム初蓄積は後述するマスターオシレータおよびRFノックアウト・ストリップライン部に改修を施した直後に実現した。改修後、先日までと同じパラメータで加速器を立ち上げ、ストリップラインでビームシグナルを観測したところ、入射ビームが1秒以上蓄積されており、試しに入射キッカーを切ってみても蓄積ビームが失われないことが確認された。まもなくビームの蓄積・積み増しに成功し、光モニタからのファーストライトを観測した（図5, 6）。この日の蓄積電流は  $1.5 \text{ mA}$  であった。

初蓄積以降、蓄積リング調整は光学関数とビーム軌道の調整を行いつつ、日々真空焼き出しを続けた。真空焼き出し時の蓄積電流値は高周波空洞部の真空インターロックで制限されており、真空度  $1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$  を越えないよう蓄積電流値を調整しながら行われた。その結果、2012年9月7日に蓄積電流  $300 \text{ mA}$  を達成した。この頃のビーム寿命 ( $I \cdot \tau$  積) は約  $470 \text{ mA}\cdot\text{hr}$  であった。真空及びビーム寿命は、運転の継続により順調に向上し、11月中旬にはビーム寿命は  $1,800 \text{ mA}\cdot\text{hr}$  と、シンクロtron利用実験が十分可能な状態となった。図7に、ビーム寿命と積分電流値の様子を示す。9月頃より、加速器の調整と並行して、ビームラインへの光取り出しと光学系調整も開始されている。

#### 4.4 中部SRでのトラブル

中部シンクロtron光利用施設ではビーム試験中、様々な問題点が発見された。これら問題点を明らかにし、解決することがビームコミッショニングの主な作業であったとも言える。以下、特に影響の大きかったものを幾つか紹介する。

- ・ビーム位置モニタ処理回路の不具合
- ・RFノックアウト、ストリップラインの不具合
- ・マスターオシレータの不安定性
- ・ブースター用電磁石電源のリプル

このうち、先の2つはビーム位置とチューンの測定が全く不可能になるような現象で、ビーム



図5 初蓄積時記念写真

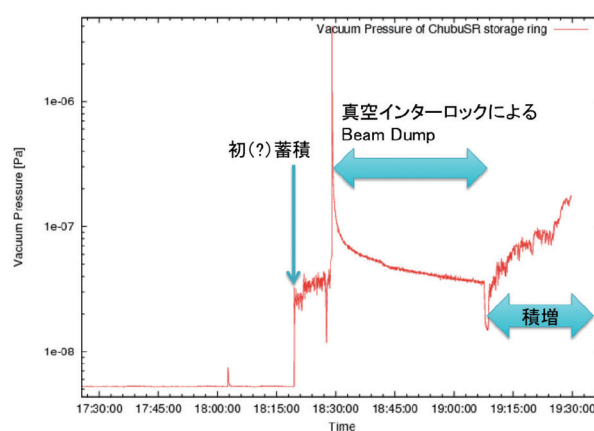


図6 初蓄積時の真空変化

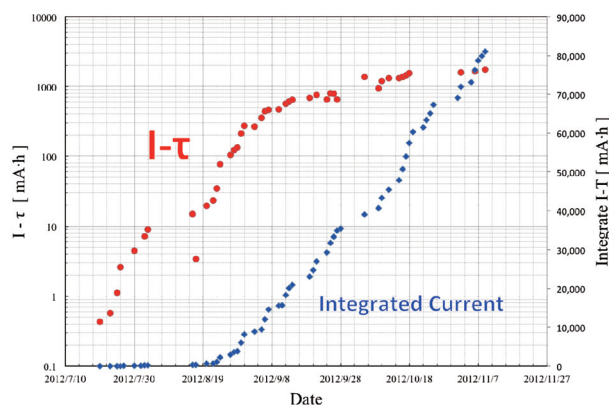


図7 ビーム寿命と積分電流値の様子

調整に大きな影響を与えた。そのため我々はビームシグナル用のRF切替器<sup>7)</sup>とオシロスコープ ( $6 \text{ GHz}$ ,  $20 \text{ GS/s}$ ) を用いてビーム情報の収集に務めた。特にチューン測定はステアリングを励磁して各ビーム位置モニタでの軌道変化を測定し、それから推測するという非常に効率の悪い方法を取らざるを得なかった。RF切替器はLAN上か



ら同軸スイッチを動作させることでビーム位置電極の切り替えを行う機器であり, UVSOR-III の立ち上げに合わせ同施設で開発されたものを一時的に借用した。

マスターオシレータの不安定性はひどい時には基準周波数 499.654 MHz に対し 200 Hz 以上の周波数変化が起こるといようなもので, 基準周波数をもとに作られたトリガー信号を使うパルス系電磁石に大きなジッターを生み出す要因となった。

最後のブースター用電磁石電源のリップルは最大 8% にも達し, ブースターシンクロトロンに対するビームの入射効率に大きな影響を与えた。この問題を改善することでようやくブースターシンクロトロンでのビーム加速が可能となった。

さらにトラブルでは無いが, ビーム調整を始めてから後悔した点として各電磁石の磁場測定点不足がある。各電磁石の磁場測定はコストと製作期間削減のため圧縮され十分な測定点が得られなかった。このため, 実際の運転においてビーム周回の様子を観測しながら, 各電磁石の励磁電流を決める必要があった。先のビームモニタ系装置不具合の問題もあり, 我々はこの作業にかなりの時間を取られることとなった。特に蓄積リングは偏向電磁石に 4 台の超伝導電磁石を採用しており, 各超伝導電磁石はそれぞれ別の電源で駆動される。常伝導電磁石 (1.4 T) と超伝導電磁石 (5 T) は磁場の絶対値が大きく違うこともあり, これら 5 台の励磁電流値調整に時間を要した。

## 5. 終わりに

中部シンクロトロン光利用施設では, 2012 年 3 月にビームコミッションを開始した。現在 (2012 年 11 月) までに, 蓄積リングは入射効率で目標 80% に対し 60%, 入射機としては線形加速器からブースターシンクロトロンまでの入出射効率で目標 30% に対し 20% を達成している。これらは供用開始に十分に対応できる値であるが, さらなる性能向上を目指しスタディを続けている。

また蓄積リングでは設計とほぼ同じ光学関数で運転しているが, Coupled Bunch Instability 起因と思われるビームサイズの拡がり観測されている。現在, この問題を解決すべく鋭意スタディ

を継続している。

本施設は今年度中の供用開始を目指しており, まもなくビームラインユーザーに試験測定 (トリアルユース) を提供する予定である。

## 6. 謝 辞

本施設の加速器設計について, 名古屋大学シンクロトロン光研究センターの協力教員である江田茂 (佐賀 Light Source) 主任研究員, 佐々木 茂樹 (JASRI/SPRING-8) 研究員, 堀 洋一郎 (KEK) 教授には設計段階から協力頂きました。大熊春夫 (JASRI/SPRING-8), 小林幸則 (KEK) 両氏には光源加速器群の仕様書作製において貴重なご意見を頂きました。KEK の原田健太郎氏にはブースターシンクロトロン四極・六極電磁石磁場測定において多大な協力を頂きました。株式会社 東芝の皆様には加速器の詳細設計・建設, そしてコミッションにも協力して頂きました。厚くお礼申し上げます。

最後に本計画の実現に向け, 共に活動してきて下さった名古屋大学シンクロトロン光研究センタースタッフ及び学内の協力教員, 科学技術交流財団および愛知県産業労働部の皆様方に感謝致します。

## 参考文献

- 1) 竹田美和, 他, “中部シンクロトロン光利用施設の建設がスタート”, 放射光 March 2010, Vol.23, No.2 (2010)
- 2) Y. Takashima, et. al., “Nagoya University Photo-Science Nanofactory Project”, AIP Conference Proceedings, 879, 75-78 (2007)
- 3) 村田垂希, 他, “中部シンクロトロン光利用施設加速器システム”, 加速器学会第 9 回年会, THPS 047 (2012)
- 4) 松田晋弥, 他, “中部シンクロトロン光利用施設加速器真空システムの設計”, 加速器学会第 9 回年会, THPS058 (2012)
- 5) 山本昌志, 他, “中部シンクロトロン入射用 50 MeV ライナックの設計”, 加速器学会第 9 回年会, THPS027 (2012)
- 6) 中山光一, 他, “中部シンクロトロン光利用施設ブースターシンクロトロン”, 加速器学会第 9 回年会, THPS046 (2012)
- 7) T. Toyoda, et. al., “TURN-BY-TURN BPM SYSTEM USING COAXIAL SWITCHES AND ARM MICROCONTROLLER AT UVSOR”, Proceedings of IBIC2012, Tsukuba, Japan, MOPA28 (2012)