

話 題

あいちシンクロトロン光センターの現状

保坂 将人^{*1}・高嶋 圭史^{*1}・渡辺 義夫^{*2}・竹田 美和^{*2}

Present Status of Aichi Synchrotron Radiation Center

Masahito HOSAKA^{*1}, Yoshifumi TAKASHIMA^{*1}, Yoshio WATANABE^{*2} and Yoshikazu TAKEDA^{*2}

Abstract

The Aichi Synchrotron Radiation Center (AichiSR) was designed mainly for industrial use and entered public service on March 26, 2013. The 1.2 GeV storage ring works with 300 mA top-up operation mode since open for public use. In this paper, the performance of accelerators and present status of public use, especially industrial one are reported.

1. はじめに

シンクロトロン光（放射光）は赤外線から X 線まで幅広い波長領域で通常光源を大幅に上回る高輝度・高品質の光を供給できることから、幅広い研究分野で利用されている。あいちシンクロトロン光センター（以下、あいち SR と記す）は、学術利用のみならず愛知県を中心とした地域の企業に放射光を利用してもらうことで、産業界に貢献することを目的とした放射光施設である。果たして、2015 年現在、あいち SR の利用は企業による利用が全体の 70% を超える勢いで推移している。さらに、施設運営のために利用者には利用料金を課している¹⁾にも関わらず、各ビームラインでは、ビームタイムの 100% 近くがユーザー利用されており、一部のビームラインではオーバーフローしている。このように、あいち SR は産業利用という面において成功を収めつつあると思っている。

あいち SR の建設の経緯であるが、中部地区に、小型で使い勝手の良い放射光施設が必要との認識のもと、名古屋大学で 1991 年から検討が開始されたことに端を発する。当初は学内利用を主に考えていたが、2000 年から 2001 年の 2 年間に「超小型放射光源とその産業応用に関する研究会」（科

学技術交流財団の研究会事業）で検討を重ねた結果、当地域の産業界に放射光のパワー・ユーザーが多数存在し、また、地元に適正規模の施設があるべきとの強い要望があることが分かった。さらに、研究会を通じて得られた施設の機能に対する期待は、小規模ながら硬 X 線も十分使える光源が欲しいということであった。これについては後に詳しく述べる。さらに、名古屋大学は放射光施設が単独にあるのではなく、補完する様々な分析機器を周辺に配置すると同時に、研究推進室、研究支援室、共同研究室、インキュベーション施設なども併設する必要があるとして「光科学ナノファクトリー」構想を提案した^{2,3)}。

一方で、産・学・行政（行政＝愛知県）の連携を推進するために科学技術交流財団が 1994 年に設置され、研究交流や共同研究などの事業を行いながら、科学技術交流センター構想の検討も進められていた。名古屋大学が 2004 年に発表した「光科学ナノファクトリー」構想は、産業界の関心も引きつけたが、愛知県も注目するところとなり、科学技術交流センター構想との融合が図られた。なかでも、小型シンクロトロン光利用施設は目玉施設として愛知県が単独でも整備すべき重要施設と位置づけられ、2 年間の調査検討の後、2006 年度の愛知県科学技術会議の答申のなかで、「知

*1 名古屋大学 シンクロトロン光研究センター Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

*2 科学技術交流財団 あいちシンクロトロン光センター
Aichi Synchrotron Radiation Center, Aichi Science & Technology Foundation
(E-mail: watanabe@astf.or.jp)

の拠点」構想の「不可欠な先端研究・実験施設（小型シンクロトロン光利用施設）」として浮上した。2009年には愛知県が土地造成費、建設費を計上し、2010年の文部科学省・地域産学官共同研究拠点整備事業の採択を受けて、建屋の建設を開始した⁴⁾。2012年7月にはFirst Lightを観測、2013年3月末にはトップアップ運転で供用開始と、急ピッチで進めてきた。

本稿では、あいちSRの加速器群の基本設計、加速器の現状と性能向上への課題、ビームラインと測定手法、ユーザー利用制度、さらには産業利用の現状について述べる。本稿がシンクロトロン光の産業利用の一例として読者の参考になれば幸いである。なお、施設の名前が確定したのは供用開始直前の2013年3月で、それまでは「中部シンクロトロン光利用施設」と仮称を用いて各方面に施設の報告を行ってきた。例えば加速器のコミショニングについては本誌「中部シンクロトロン光利用施設（仮称）のコミショニング」⁵⁾に詳しく書かれている。

2. あいちSR加速器群の基本設計

ここであいちSR加速器群の基本設計について述べる。設計の基本となったことは次の7つの項目である（以下は「中部シンクロトロン光利用施設（仮称）光源デザインレポート」からの抜粋）。

- 1) 地域の中核施設として適正規模であること、
- 2) コストパフォーマンスに優れていること、
- 3) 10 keV以上のX線を10本程度のビームラインに供給できること、
- 4) 挿入光源が設置可能であること、
- 5) トップアップ入射による一定電流運転が可能であること、
- 6) 既存の技術で無理なく実現可能であること、
- 7) 運転維持管理が容易であること。

1) については、具体的にどの程度を適正規模というのか、判断は分かれるところであるが、全国共同利用施設である高エネルギー加速器研究機構のPhoton Factory（周長187 m）と比べて十分に小さいことをひとつの目安とした。すなわち、周長50 mを大幅に上回らないことを目標とした。設計当初はブースターシンクロトロンおよびライ

ナックは別棟の光源棟に納める計画であった。敷地内の配置の都合上、ブースターシンクロトロンおよびライナックを光源加速器内に納めることとなり、光源群すべてが実験ホールの中央部に位置することとなった。そのために周長は当初案（64 m）よりやや長くなり最終的に72 mとなった。

3) については、これまでの調査によって中部地区のシンクロトロン光の需要が硬X線領域に多いことを考慮の上で決められた。ここで、シンクロトロン光の短波長側の限界の目安を与える臨界光子エネルギー ϵ_c は電子エネルギー E_e と磁場強度 B で決まり、以下のような式で表すことができる。

$$\epsilon_c [\text{keV}] = 0.665 E_e^2 [\text{GeV}] B [\text{T}]$$

臨界光子エネルギーを超えると光強度は減少するが、実際上は、この臨界光子エネルギーの5倍程度までは利用可能である。通常のシンクロトロン光源で使われている磁場は1 [T]程度で、この場合ビームエネルギー1 [GeV]の電子蓄積リングでは臨界エネルギーが0.7 [keV]となり、3)の要求は満たせない。そこで我々は偏向電磁石の一部を超伝導偏向電磁石（Superbend）にして磁場強度を通常の偏向電磁石の数倍まで高めることで硬X線を発生することを考えた。Superbendコイルの超伝導線材としてNbTiおよびNb₃Snを用いることが考えられた。最大臨界磁場はNb₃Snの臨界磁場より低いものの、これまでの超伝導電磁石への利用実績を考慮してNbTiを選択し、磁場強度は余裕を持って5 [T]に抑えた。また、この磁場条件で3)の要件を満たすために電子ビームのエネルギーを1.2 [GeV]とした。Superbendからの臨界光子エネルギーは4.8 [keV]となりおよそ20 [keV]までの硬X線が利用可能である。合計で12台の偏向電磁石のうち4台を偏向角12度のSuperbendとし、1台から最大で3本のビームラインにシンクロトロン光を取り出すことにした。Superbendの冷却はコストとメンテナンス性を考えて、液体ヘリウムを用いず、小型冷凍機による直接冷却を採用した。

4) は、極紫外・軟X線領域での高輝度光の需要、あるいは、より短波長のX線の要求に応えるためにアンジュレータや超伝導ウィグラの導入の余地

を残しておく, というものである. 現在, 長直線部には Apple-II 型アンジュレータが設置されていて, エネルギー 30 [eV] から 1 [keV] の輝度の高いアンジュレータ光の発生に利用されている.

5) は, 既に一部の先進的なシンクロtron光施設で導入されているトップアップ運転を比較的早い段階から導入し, 常に強度と質が一定の光を供給するためである. 運転の容易さを考慮し入射器は線形加速器+ブースターシンクロtronを採用した. トップアップ運転の導入に備え, ブースターシンクロtronのエネルギーは 1.2 GeV のフルエネルギーとした.

6) については, 既存施設の加速器研究者の協力を得ながら最新の加速器技術を導入するものの, 基本的には, 実績のある技術を中心にして, 開発的要素を極力抑え, 建設および立ち上げ調整を短期間で終了し, 可能な限り早く定常運転を開始するためである.

7) については, 建設期, 初期運転期にはできるだけ多数の加速器研究者・技術者の参加を求め, その後の定常運転期は, 比較的小さな組織で運転維持管理できるよう設計段階から配慮するべきであると考えた.

最終的に決定したあいち SR 加速器群パラメータを表 1 にまとめる.

表 1 あいち SR 加速器群のパラメータ

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
自然エミッタンス	53 nmrad
ベータatronチューン	(4.72, 3.23)
RF 周波数	499.564 MHz
ハーモニクス数	120
超伝導偏向電磁石磁場	5 T
常伝導偏向電磁石磁場	1.4 T
ブースターシンクロtron	
最大ビームエネルギー	1.2 GeV
周長	48 m
繰り返し	1 Hz
線形加速器	
ビームエネルギー	50 MeV
加速電荷量	1 nC
RF 周波数	2,856 MHz

3. 加速器の現状と性能向上への課題

光源加速器のコミッショニングは 2012 年 3 月の入射器コミッショニングから始まり, 2012 年 7 月には First Light を観察, 9 月に蓄積リングの電流値が目標である 300 mA に達した. その後, 2013 年 3 月の供用開始まで, 蓄積リングの真空枯らし運転を行いながら, 線形光学関数や入射器の調整, 6 極電磁石の調整, ビーム位置モニター (BPM) の beam-based-alignment を行った.

供用を開始した当初より, 総じて常に安定した光を供給する蓄積電流 300 mA のトップアップ運転を実現しており, トップアップ運転中の電流値変化は約 0.2% であることから, 短時間かつ高精度の測定が可能となっている. 供用開始後は, 加速器の制御およびモニターシステムの性能を高めるソフトウェアの開発が進められた. 例えばアンジュレータの free tuning 制御ソフトウェアの開発によってユーザーは自由にアンジュレータギャップを変更できるようになった. モニター系に関しては double slit による垂直方向ビームサイズ測定を常時行えるようになっている.

あいち SR は 4 台の Superbend のうちの 1 台でも故障すると, 蓄積リングに電子ビームを蓄積することが不可能になる. あいち SR の Superbend を設計する上で参考にした Advanced Light Source (ALS) においては十分な実績⁶⁾があったがあいち SR において実際にどうなるかは不明な面もあった. Superbend は小型冷凍機を外し, 消耗部品を交換するメンテナンスを 2013 年 1 月, 2013 年 12 月, 2014 年 7 月, 2015 年 4 月と年に 1 回以上の頻度で行った上で, 現在まで故障なく稼働している. ただ, Superbend の運転中に瞬停が起き, コイルに電流を流す DC 電流の急な遮断でクエンチすることがあった. そこで 2013 年に Superbend の DC 電源に瞬停補償装置を装備し, それからは瞬停によるクエンチも起きなくなった. ただし, これは Superbend そのものの問題ではなく, Superbend 自身のトラブルはゼロである.

Superbend 以外の箇所故障については, コミッショニング時に初期不良と思われる故障が頻発したが, ほとんどが供用開始以前に治まっている. 2016 年現在も加速器の常として故障が全く

ないということはないが、数日にわたるような長期故障を起こすことなく稼働している。

今後、シンクロトロン光の質を向上させるために必要ないくつかの課題がある。それを挙げると以下ようになる。

- 1) 蓄積ビーム寿命の突発的急落現象
- 2) トップアップ時の蓄積ビームの振動
- 3) ビーム軌道の安定化
- 4) 集団的シンクロトロン振動の抑制

これらによって現時点で利用上大きな支障が出ているというわけではないが、より高度な利用を考える上で解決していきたいと考えている。1)については供用開始時点で頻発した。運転中に突然、蓄積リングビームサイズが増大し、同時にビーム寿命が非常に短くなる現象である。ビームダクト内にダストが発生しそれが電離されることで、電子ビームの電場で捕えらるるダストトラップによるものと考えられた。当初は電子ビームのfillingを120バケットのうち80にして運転していたが、これを110まで増やしたところ、この現象がほとんど見られなくなった。このダストトラップは

バンチあたりの電流値と関係しているようであるが、明確なことがわからないうちに解決してしまった感もある。2)に関しては2015年10月にパルス6極電磁石を導入してトップアップ入射時のビーム軌道の瞬間的な変動を抑制する研究を進めている。3)に関して加速器の運転中にビーム軌道が数10 μm 変動することが観測されている。軌道変動と加速器室内の機器温度の相関から加速器室内の温度変化が主要な原因となると考えられる。温度調整システムの高精度化および軌道feedbackの導入を現在考えている。4)については蓄積リングビームが集団的にシンクロトロン振動していることで分散のあるところで水平方向ビームサイズが大きくなり、輝度が10%~20%程度落ちていていると考えられる。将来的に他の施設で成功している bunch by bunch feedback の導入⁷⁾によって改善されると考えられる。

あいちSRの運転および調整は、名古屋大学の教員3名、技術職員2名、業務委託の技術者2名、計7名の定員という比較的少ない人数で行っている。また、加速器の故障対応およびメンテナンスについては保守契約している(株)東芝にサポートをしてもらっている。

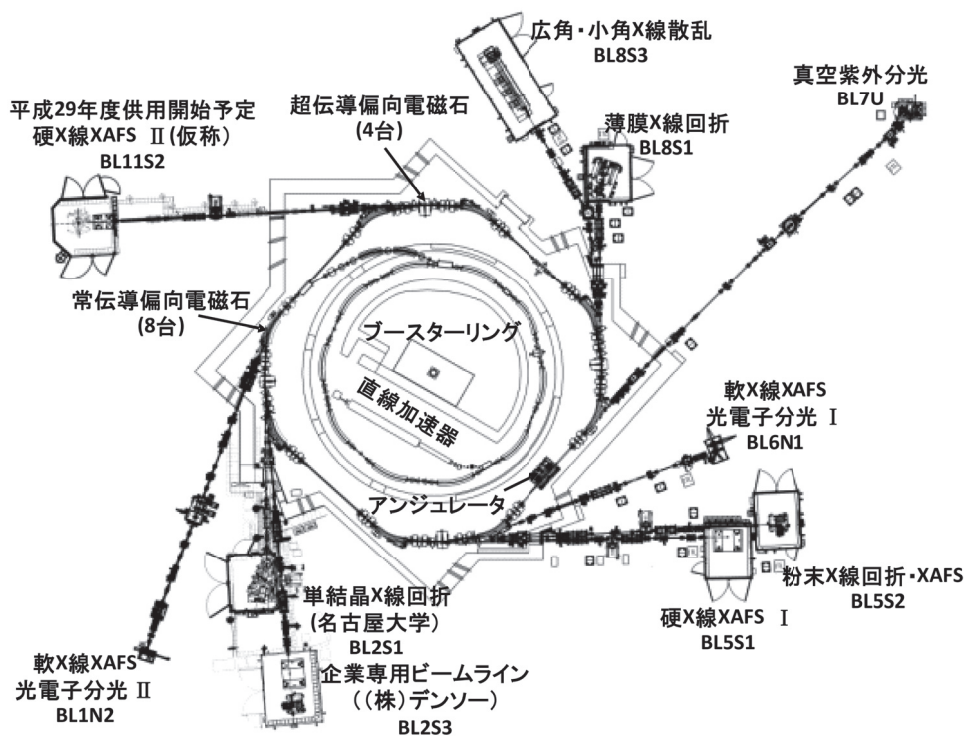


図1 あいちSRの加速器群とビームラインの構成

4. ビームラインと測定手法

ビームライン構成を図1に、ビームラインの仕様一覧を表2にそれぞれ示す。硬X線XAFS I (BL5S1), 粉末X線回折・XAFS (BL5S2), 軟X線XAFS・光電子分光 I (BL6N1), 真空紫外分光 (BL7U), 薄膜X線回折 (BL8S1), 広角・小角X線散乱 (BL8S3) のビームライン6本は建設当初から計画されていたものであるが、その選定は、愛知県の学界および産業界の要望に添ったものである。一方、軟X線XAFS・光電子分光 II (BL1N2) は、当初のXAFSビームライン群で空白であったエネルギー範囲をカバーする軟X線用(0.5～1.6 keV)であり、文部科学省の光ビーム・プラットフォーム事業で整備が認められたビームラインである。これにより、30 eV から20 keV までのエネルギーを全てカバーできるXAFSビームライン群が揃い、リチウムからウラ

ンまで自然界に安定に存在する全ての元素を対象としたXAFS分析を可能にしている。また、名古屋大学が文部科学省の補正予算で整備を進めた単結晶X線回折 (BL2S1) も既に供用開始している。さらに、現在は、図1に示す通り、硬X線XAFS II (仮称) (BL11S2) と(株)デンソー専用 (BL2S3) のビームライン2本が建設中である。BL11S2は、ユーザー利用がオーバーフローしているBL5S1の利用緩和、およびユーザーによる大型実験装置持込みを可能にすることを目指して整備を進めている。

5. ユーザー利用制度

産業界に貢献することを目的とした施設ということから、あいちSRの利用申込は、表3に示す通り、2ヶ月毎の年6回と、計画的な利用促進を図るための年2回の長期利用申込制度を設けて運用している。

表2 ビームラインの仕様一覧

ビームライン名	測定手法	光エネルギー (波長範囲)	利用分野
硬X線XAFS I BL5S1	硬X線XAFS 蛍光X線	5～20 keV (0.25～0.06 nm)	材料中の原子周りの局所構造, 注目 元素の化学状態
軟X線XAFS・光電子分光 I BL6N1	軟X線XAFS 光電子分光	1.75～6 keV (0.2～0.7 nm)	材料中の原子周りの局所構造, 注目 元素の化学状態
軟X線XAFS・光電子分光 II BL1N2	軟X線XAFS 超軟X線XAFS 光電子分光	0.5～1.6 keV (2.5～0.8 nm)	材料中の原子周りの局所構造, 注目 元素の化学状態
真空紫外分光 BL7U	超軟X線XAFS 真空紫外分光 光電子分光	0.03～0.85 keV (40～1.5 nm)	固体材料中の原子の化学結合状態, 電子状態
粉末X線回折・XAFS BL5S2	粉末X線回折 硬X線XAFS	5～23 keV (0.25～0.05 nm)	セラミックス, 電池材料, 建築材料 などの結晶構造 材料中の原子周りの局所構造, 注目 元素の化学状態
薄膜X線回折 BL8S1	X線反射率 薄膜表面回折	9.16, 14.37 keV (9.16 keVで運用中) (0.135 nm)	有機・無機多層薄膜の表面や膜境界 面の凸凹, 膜密度
単結晶X線回折(名古屋大学) BL2S1	単結晶X線回折	7～17 keV (0.18～0.07 nm)	タンパク質等の結晶構造
広角・小角X線散乱 BL8S3	広角・小角散乱	8.2 keV, 15.5 keV (0.15 nm, 0.09 nm)	材料中の原子周りの局所構造, 注目 元素の化学状態
新設ビームライン ※平成29年度供用開始予定			
硬X線XAFS II (仮称) BL11S2	硬X線XAFS 多機能型 (予定)	5～25 keV (予定) (0.25～0.05 nm)	材料中の原子周りの局所構造, 注目 元素の化学状態

これは、申込から利用までの時間をできるだけ短くして欲しいという要望や再現性や類似試料測定のための定期的な繰り返し実験の要望に応える仕組みである。1週間のうち、原則的に、火曜日から金曜日までがユーザー利用日であり、月曜日は光源加速器のメンテナンスを行っている。1日の利用は、10:00~14:00, 14:30~18:30の2シフト（1シフトは4時間）で行っている。また、産業界の要望である成果非公開を満たすべく企業ユーザーに対して成果非公開有償利用で運用している。一方、大学や公的研究機関では、成果の公開を前提に利用料金を低く抑えている⁸⁾。加えて、2013年7月からは様々な産業分野の活用事例を蓄積し、企業等のさらなる利用拡大を図ることを目指して、文部科学省の「先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業」を活用した成果公開無償利用事業を実施している⁹⁾。いくつかの企業あるいは大学や研究機関等が成果公開無償利用の後には有償利用へと繋がっており、着実に効果を上げている。

6. 産業利用の現状

供用を開始した2013年度は、企業82社、大

表3 利用申込

●一般利用申込

申込期間	第1期申込 [3月]	第2期申込 [5月]	第3期申込 [7月]	第4期申込 [9月]	第5期申込 [11月]	第6期申込 [1月]
対象期間	4月・5月	6月・7月	8月・9月	10月・11月	12月・1月	2月・3月

●長期利用申込

申込期間	前期利用 [3月]	後期利用 [9月]
対象期間	4月~9月	10月~翌年3月

学等20の公的機関からの利用があり、2014年度には、さらに増えて155の企業・大学等が利用しており、現在までに200を超える。言い換えると、2014年度の新規ユーザーは53、2015年度は3月のユーザー利用予定も含め45を超える新規ユーザーとなり、企業等ユーザーの裾野は着実に拡大している。図2は、供用開始から現在までの月別のユーザー利用総シフト数の年次推移を示したものである。年を追う毎に増加しているのが分かる。また、総利用実績についても、2013年度は1,061シフトであったのに対して、2014年度には33%増の1,409シフトと順調に増加している。図2に示す通り、光源加速器やビームラインのメンテナンス、増設工事などのため、1ヶ月間の運転停止期間を設けている。毎年その月が変わっていたが、今後は4月の停止に落ち着く予定である。他の多くの施設が運転停止となる8月、9月も運転しており、我が国のシンクロtron光施設が全く使えなくなる時期を作らないよう配慮している。

所属機関別にユーザーの利用状況を調べてみると、供用開始からの2年間では全体の68%が産業利用（企業単独58%、産学共同10%）であり、2015年度は3月のユーザー利用を含め、74%（企業単独68%、産学共同6%）と、さらに産業利用の割合が増加しており、産業利用の比率は他施設と比べて極めて高い割合となっている（図3）。企業ユーザーを地域別に調査してみると、図4に示す通り、愛知県内企業の利用件数が全体の62%を占め、愛知県を含めた中部地区の利用は

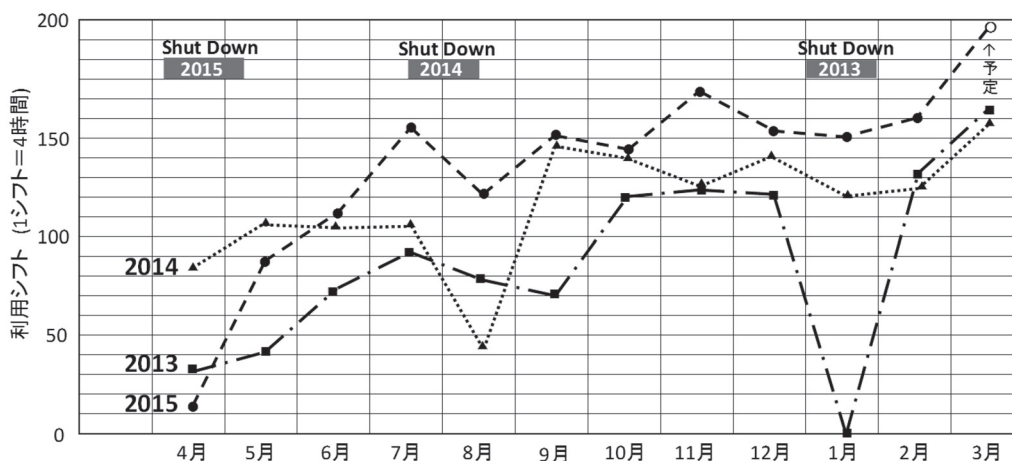


図2 月別のユーザー利用総シフト数の年次推移

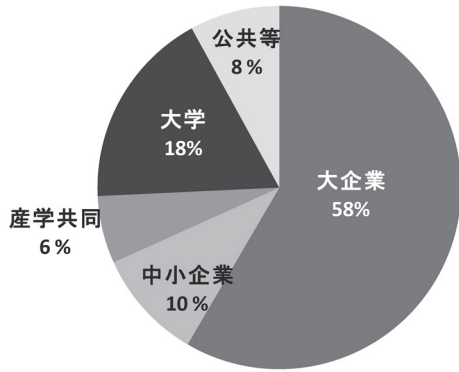


図3 所属機関別ユーザーの利用状況 (2015年度)

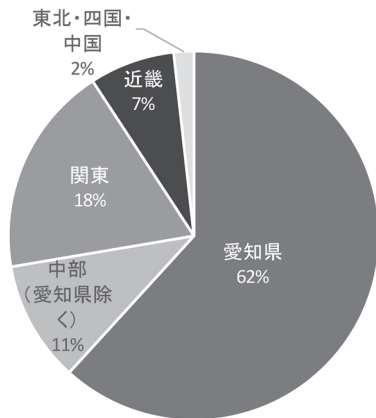


図4 地域別企業ユーザーの利用状況 (2015年度)

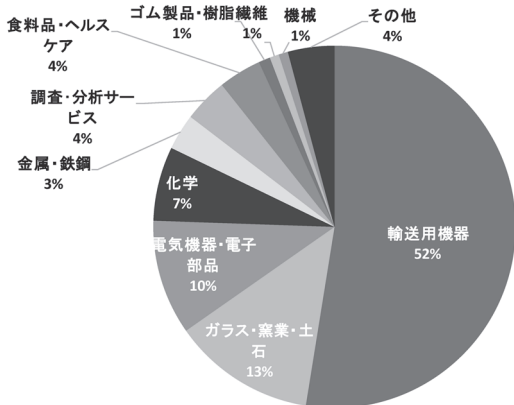


図5 業種別企業ユーザーの利用状況 (2015年度)

73%となっている。一方、関東地域は18%、近畿地域は7%であり、全国規模で利用されていることが分かる。利用企業の業種は、図5に示す通り、輸送用機器が最も多い52%を占めている。その他、窯業、電子部品、化学、ヘルスケアなど幅広い産業分野に活用されているのが分かる。このように、あいちSRは、産業界にとって使い易い計測・分析施設として認知されつつあると確信している。

7. まとめ

あいちSRが、これまで成功裡に進捗しているのは、いくつかのキーとなる要因がある。まずは、2013年3月26日の供用開始から、安定した光を供給する蓄積電流300 mAのトップアップ運転でのユーザー利用がスタートしたことが挙げられる。また、愛知県は輸送用機器をはじめとする我が国のモノづくり産業の中心に位置しておりパワー・ユーザーが多いことである。さらには、専門分野に精通した複数の産業利用コーディネータを配置して、ユーザーの窓口となり、利用相談から測定後のフォローまで技術者、研究者と協力して、一貫したユーザー支援を行う運営体制を敷いたことである。あいちSRは、今後もさらなる利用技術を充実させ、利用拡大に努めていきたいと考えている。

謝 辞

本事業を円滑に遂行するために、常日頃共に汗を流している科学技術交流財団あいちシンクロトロン光センターおよび名古屋大学シンクロトロン光研究センターのスタッフの皆様、さらには愛知県産業労働部の皆様方に感謝いたします。

参考文献

- 1) あいちシンクロトロン光センターのホームページ; <http://www.astf-kha.jp/synchrotron/>
- 2) 高嶋圭史, “名古屋大学小型光源の仕様”, NSSRシンポジウム, 2004年6月4日.
- 3) 高嶋圭史他, “中部シンクロトロン光利用施設(仮称)計画”, 放射光, **21**, pp. 372-380 (2008).
- 4) 竹田美和, “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, **23**, pp. 88-94 (2011).
- 5) 山本尚人他, “中部シンクロトロン光利用施設(仮称)のコミッションング”, 加速器, **9**, pp. 223-228 (2012).
- 6) D. Robin, et al., “Successful Completion of the ALS Superbend Project”, Proc. of EPAC2002, Paris, France, pp. 215-217 (2002).
- 7) T. Nakamura, K. Kobayashi, “FPGA Based Bunch-by-bunch Feedback Signal Processor”, Proc. of ICALEPCS2005, Geneva, Switzerland, PO2.022-2 (2005).
- 8) <http://www.astf-kha.jp/synchrotron/userguide/about/>
- 9) 竹田美和, “あいちシンクロトロン光センターにおける産業利用と光ビームプラットフォーム”, OPTRONICS, **34**, pp. 1-7 (2015).