

X線自由電子レーザー施設

SACLA

進化する日本の技術

SACLA 公式キャラクター
播磨サクラ & ピコネコ & エイトドクターズ



国立研究開発法人 理化学研究所 放射光科学総合研究センター

〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1 TEL:0791-58-2800 FAX:0791-58-2898

URL: <http://xfel.riken.jp/> E-mail: riken@spring8.or.jp



技術立国 日本を支える SACLA



理化学研究所
放射光科学総合研究センター
センター長 石川 哲也

国際研究開発法人理化学研究所と公益財団法人高輝度光科学研究センター(JASRI)が共同で建設したSACLAは、平成24年3月に、米国スタンフォードのLCLSに次いで世界で二番目のX線自由電子レーザー(XFEL)として共用運転を開始しました。その後、着実に高度化を続け、内外の多くの研究者にお使いいただいている。平成23年6月の最初のFELライン(BL3)でのレーザー発振以来、平成26年10月には、二本目のFELライン(BL2)のレーザー発振にも成功し、平成27年4月にはBL2も共用運転を開始いたしました。この結果、平成27年6月現在、世界にある硬X線FELライン3本の内の2本がSACLAにあることになりました。一方で、自発光の広帯域利用として整備されたBL1に、SACLAのプロトタイプとして建設されたSCSSを移設し、軟X線FELとして利用する計画が進められ、近い将来共用運転が開始される見込みです。このようにSACLAは順調に成長しておりますが、利用の拡大に合わせて今後残る2本のFELラインの整備を進めていくことを考えています。

SACLAは、諸外国で数キロメートルの規模で計画されていたXFELを700 mで実現したものであり、SACLA以降のXFEL計画はSACLA同様コンパクト化することが常識となりました。可能な限りの小型化を図るために、システムとしても、我が国独自のものとし、単結晶カソード電子銃、高勾配Cバンド加速システム、短周期真空封止型アンジュレータなど、多くの独自要素技術を結集して設計されています。要素技術の多くは、厳選された素材、高度の加工技術、高精度計測制御技術など、我が国の広範な産業技術に支えられています。このため、SACLAは先端基盤施設の中では、国産化率が抜きんで高いものとなりました。

一方でSACLA建設にあたっては、当時の水準では未踏の様々な技術も要求することとなりました。それらの一つ一つを我々とメーカーの皆様との協力のもと、技術の高度化を達成することによって、SACLAを完成させることができました。我々の高い要求に応えて頂いた皆様のご努力に感謝するとともに、我々も微力ながら我が国の技術水準の向上に貢献できたものと喜んでおります。

SACLAの性能は当初計画を既に凌いでおり、また先行する米国LCLSとの比較においても、優れた安定性や再現性など、SACLAが既に優位に立っている面も多く、SACLAを利用した我が国の科学技術の飛躍的な発展が期待されています。既にいくつかの新奇な利用方法が開発され、今後産官学の利用者の皆様方と協力してさらに良いものにしていくことを計画しております。

本冊子は、初版以来35,000部を発行し、皆様から望外のご好評を頂いてまいりましたが、今回第7版の発行に伴い、最近の情報を加味して大幅な改訂を行うこといたしました。

今後とも、皆様のさらなるご支援・ご協力をお願いする次第です。

※SACLAとは、Spring-8 Angstrom Compact Free Electron Laserの略です。



XFELとは
自然現象や生命活動の根源を探ると、その多くは原子や分子の並びかたや動き、そしてそれらの集まりの中での電子の動きまでさかのぼります。原子や分子の配列と動きや、電子の動きを直接観察できれば、難病の原因解明と薬の創出、地球環境を悪化させる物質の抑制方法の確立など、私たちの生活の向上に大きく役立ちます。

こうして、XFELが実現
1895年にレントゲンによって発見されたX線は、病院での診断でよく知られていますが、可視光に比べ波長がとても短い光で、原子や分子のレベルで物質の微細構造を観察するのに利用されました。Spring-8では、たくさんの電子がばらばらにアンジュレータの中を通過するので、出てくる光はコヒーレントではありません。

SACLA実現への道のり
高エネルギー電子をたくさんの磁石を並べた「アンジュレータ」の中を通すと、光が発生します。これにより、テラヘルツから赤外・可視さらにX線までの広い波長域の光が得られます。電子のエネルギーがとても高く、アンジュレータの磁石周期が短いとこの光はX線になります。これは、実はSpring-8でも使われているX線発生方法です。Spring-8では、たくさんの電子がばらばらにアンジュレータの中を通過するので、出てくる光はコヒーレントではありません。

SACLAの挑戦は続く
SACLAは培ってきた多くの技術の粋を集めることによって、完成した国家基幹技術・SACLAは、今後その利用によって、新たな技術を産み出すことに貢献します。SACLAによって創られる新しい光は、将来にわたって科学・技術・産業から次々と湧き上がる課題を、原子レベルからの理解によって解決するでしょう。SACLAを作り上げるとき、私たちは多くの埋もれていた技術や材料を掘り起し、それらに新たな使命を与え活用してきました。同様に、原子レベルの構造や機能を理解することにより、今まで定性的な理解に留まっていた様々な現象に新たな光を当て新しい科学や技術の創生につなげていくこともSACLAの課題です。これらにより、SACLAはより少ない資源に、より少ないエネルギーの注入で、より大きな付加価値を得ることに不可欠な技術的基盤を提供します。一方で、ここで産まれた新しい技術がSACLAを進化させ、さらに新しい技術の創生を可能とします。現時点で私たちが想像することもできないような画期的な新技術や新産業の礎がSACLAによって創られていくことを信じて、一層の挑戦を続けていきます。

SACLAが創る日本の未来
SACLAは、その光合成反応を行っているタンパク分子の構造が原子レベルで解明されました。今後は、これらのタンパク質の機能が解ってくらうでしょう。現在私たちが住む地球は様々な問題に直面しており、人類が持続的に生存するためにはそれらを解決していく必要があります。人類社会が抱える課題に、科学技術は応えられるのでしょうか？

持続的・社会を創るために
非常に強い光を出す光源としてレーザーがあります。X線レーザーを使うと、原子や分子の瞬間的な動きを観察することができます。レーザーは位相の揃ったコヒーレントな光（光波の山と谷、谷と谷が揃うこと）を発生し、様々な光技術に応用されていますが、従来のレーザー技術の延長で波長の短いX線レーザーを作ることは不可能でした。

エネルギー資源を生成する
植物は数十億年の間、二酸化炭素と水から酸素と炭水化物を作る光合成を行っています。

触媒反応をみる
省エネルギーをつくりるために活性化エネルギーの高い反応を進める方法は、2種類あります。

SACLA発振
X線自由電子レーザー施設SACLA(さくら)は、2011年6月7日にX線レーザーの発振に成功しました。

世界が直面する課題
中心で小さく発光しているのがX線レーザーです。グラフは、世界最短波長となる1Å(オングストローム)を達成した時のスペクトルを示しています。

日本が直面する課題
左)水を酸素と水素イオンに分解するタンパク質の分子構造
右)二酸化炭素から炭水化物をつくるタンパク質の分子構造

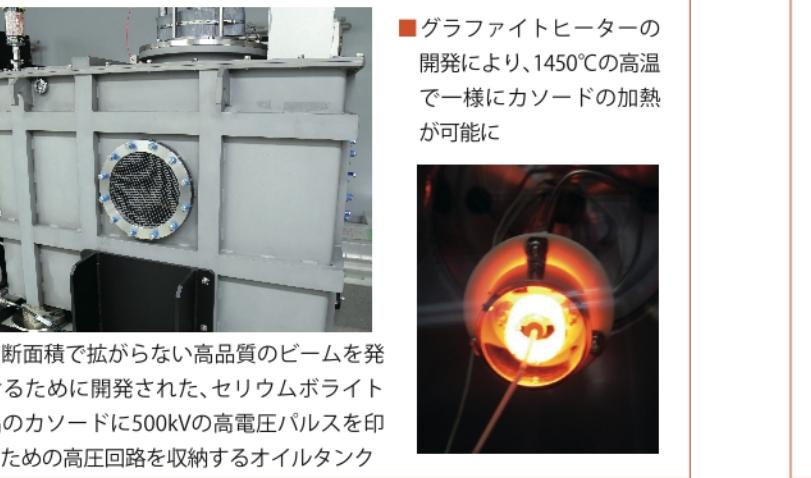
SACLAができることは？
長期的視点
・化石燃料や核燃料に頼らないエネルギー源の開発
・同時に様々な省エネ技術の開発
・エネルギー生成廃棄物処理技術

有機化学での燃焼反応では、多くの場合、水と二酸化炭素とエネルギー(熱)が生成されます。水や二酸化炭素を分解してエネルギー源に戻すためには、大きなエネルギーが必要です。少ない注入エネルギーで水や二酸化炭素が分解できないか、原子スケールでの解明が必要になります。

光合成反応が「どのように起こっているか」という研究は進んでいますが、SACLAを使うと、原子スケールでなぜ反応が進むのかが解ります。それにより、人工光合成触媒の設計ができるようになります。

持続可能社会の実現に向けて
SACLAは歩み続けます。

高品位な電子ビームを生み出す電子銃



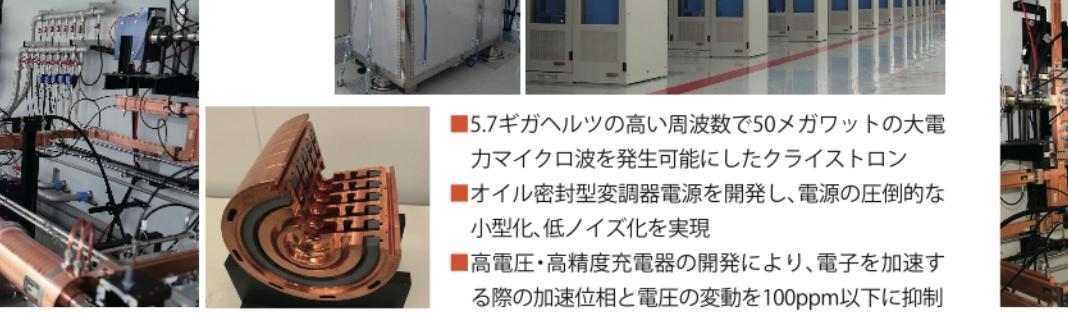
■グラファイトヒーターの開発により、1450°Cの高温で一样にカソードの加熱が可能に



■小さな断面積で拡がらない高品質のビームを発生させるために開発された、セリウムボライト単結晶のカソードに500kVの高電圧パルスを印加するための高圧回路を収納するオイルタンク

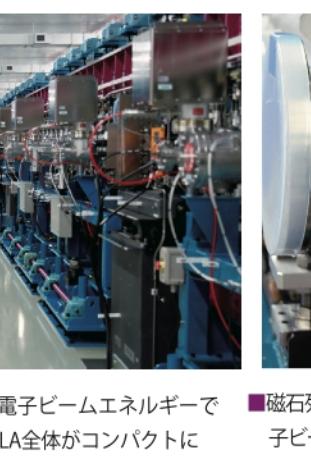
電子を効率よく加速するCバンド加速器

■電子の加速能力を従来の約2倍にするCバンド加速器(5.7ギガヘルツ)を開発し、加速器のコンパクト化を実現
■高純度の無酸素銅とそれを1ミクロン精度で加工する技術により、1cmあたり350kVという高電界を持つ加速管が可能に



■5.7ギガヘルツの高い周波数で50メガワットの大電力マイクロ波を発生可能にしたクラリストロン
■オイル密封型変調器電源を開発し、電源の圧倒的小型化、低ノイズ化を実現
■高電圧・高精度充電器の開発により、電子を加速する際の加速位相と電圧の変動を100ppm以下に抑制

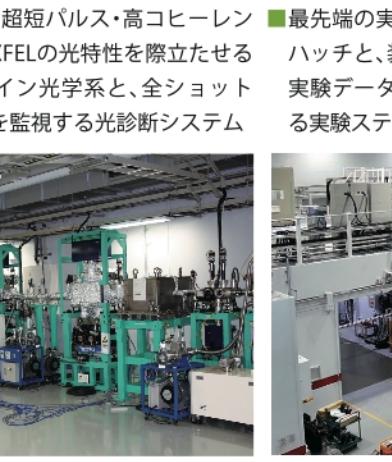
■0.01°Cの温度調整を可能にした冷却水循環技術により、加速管の熱膨張による変動を防止



■高品質な電子ビームは、輸送部を経由してアンジュレータに送られる

■真空封止アンジュレータによって、低い電子ビームエネルギーでもX線レーザーの発生が可能となり、SACLA全体がコンパクトに磁石列を電子ビームに最小15mmまで近づけ、強力な磁力を与える

X線レーザーを生み出す真空封止アンジュレータ



■最先端の実験装置を収容可能な実験ハッチと、装置を遠隔制御し、大量の実験データをリアルタイムに取得する実験ステーション(大阪大学との共同研究)



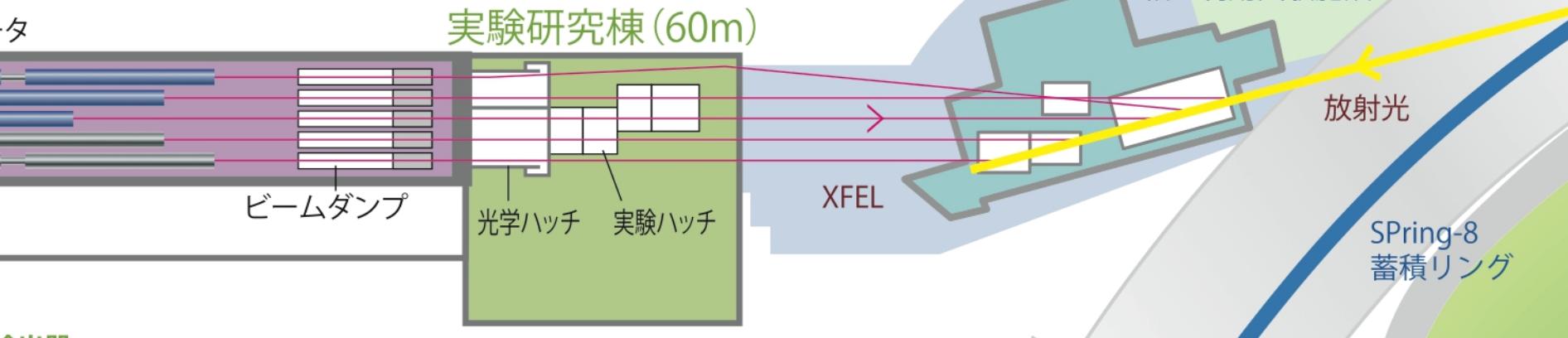
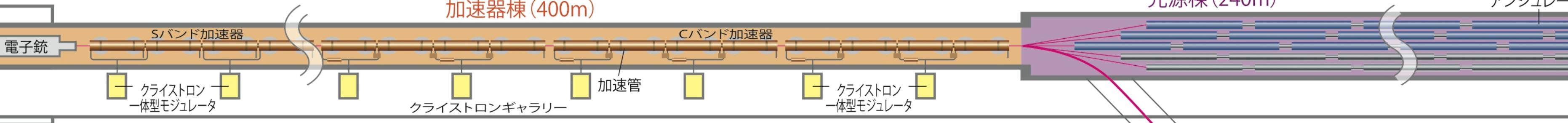
■1ナノメートルの表面形状精度を持つ冷却水循環技術により、加速管の熱膨張による変動を防止



XFELと放射光を同時に照射できる世界唯一の施設では、フェムト秒で原子の世界を探査する。



XFEL-SPring-8相互利用実験施設



SACLAを動かす高精度・高安定な制御機器



■高電圧・高ノイズ環境下でも機器を安定に動作させる制御技術
■20ppm(10万分の20)の精度で電磁石を制御する高安定電源
■放射線環境下でも使用可能な位置読み取り装置付ステッピングモータシステム

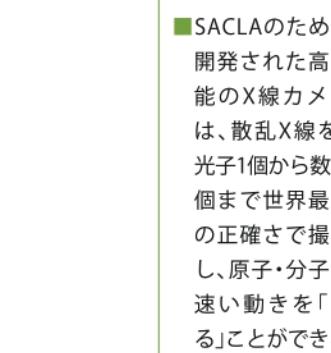


■電子ビームの電荷量を0.5ナノ秒の超高速度で測定する電流モニター(上)
■電子ビーム位置を1ミクロン以下の精度で計測する電子ビーム位置モニター(下)



■コンクリート床面を平面度50ミクロンで研削する装置を開発し、架台底面の接地面積が増え、架台の振動特性が大幅に向上了
■光源棟を支えるために、最大深さ16m・長さ150m・幅50mの人工岩盤を、碎石置換で敷設

SACLAの検出器



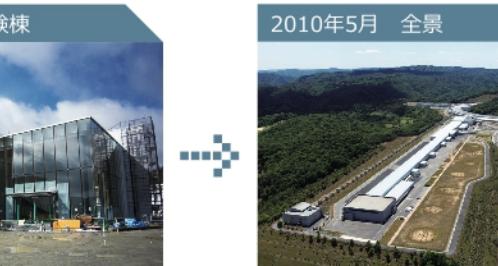
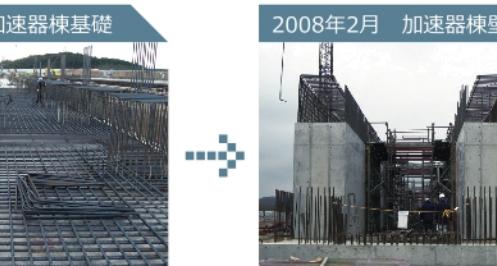
■SACLAのために開発された高性能のX線カメラは、散乱X線を、光子1個から数千個まで世界最高の正確さで撮影し、原子・分子の速い動きを見ることができる



■SACLAとスパコンとの連携による大規模データ解析
SACLAのデータ解析システムにより、検出器からの大規模データを高速に保存し、分析する(左)。さらに精密な解析のため、神戸のスーパーコンピュータ「京」を利用する(右)。



SACLAを創った日本の技術



CLAを支える日本之力

ARKUS
クハリマ(株)
アールアンドケー
エレスコンボーネンツ(株)

大阪販売(株)
ヤパン(株)
オーアール
キューブ
シテクノセンター

インテックス(株) (株)関西C I C研究所
ニフ(株) 関西電子(株)
エア (株)神崎組
・ジー カンタムエレクトロニクス(株)
ジニアリング(株) (株)キーエンス

ACLAを支え

る日本の力

(株)日本ローパー	日立電線商事(株)	北海道シス トム
(株)ニラコ	日立電線販売(株)	Mywayブラン チ
N E O M A X エンジニアリング(株)	(株)日立ハイテクノロジーズ	(株)マイク
(株)ネツシン	(株)日立ハイテクフィールディング	(株)セイコ
(株)カーナードエレクトロニク	(株)日立リース	ス

・サイエンス(株)
株) メガトラスト
メスティック
メスグリオ(株)
メレック
・メラク・メニコ・メニク・メニク(株)

アイ・アール・システム	(有)イ・アール・システム
I H I 検査計測	石田精機(株)
I H I ビジネスサポート	(有)石川
クラフト(株)	(有)ヰタ
アイ・シ・エス	伊藤喜一
I D X	伊藤忠
アイデン	伊藤電
産業(株)	(株)ヰタ
リス(株)	(株)ヰタ
アーリン真空	(株)ヰタ
鉄工(株)	入江工
アキコーポレーション	岩通計
セス(株)	(株)ヰタ
アクティオ	(株)ヰタ
アクロラド	Winco
朝日工業社	ウメト
旭工業所	(有)ウメト
旭製作所	(株)コ
旭測器	H P C
イヤモンド工業(株)	(株)H P C
レント・テクノロジー(株)	H P C
アスク	英和(株)
コット(株)	栄和商
ニクス(株)	(株)コ
ビル(株)	(株)コ
アツマセラミティック	(株)A
アド・サインス	(有)コ
アドバネット	(有)コ
アドバンテック	(株)コ
パンテック東洋(株)	Exelis
アスト岩田(株)	(株)コ
アーバルデータ	(株)コ
ライド(株)	(株)S
アプロリンク	S A F
アムテックス	(有)コ
ミ工業(株)	S C S
アルゴ	エス・
アルゴグラフィックス	エドモ
アルパック	(有)コ
パックイーエス(株)	N E C
パックテクノ(株)	(株)コ
パッカ工業(株)	N T T
アロン社	N T T
アンサイオーエーサービス	荏原冷
シス・ジャパン(株)	

クス	(株)エルクス
(株)	(株)塙山
建築事務所	遠藤科学
製作所	エンペック
商店	(株)応用研
事(株)	応用光研
カソノリューションズ(株)	応用地質
工業(株)	大久保電機
商店	大倉電機
キン	(株)大阪セ
ージワン	大阪ラセ
(株)	オージャ
(株)	(株)オオツ
デコ	(株)大塚製
フラレッド	(株)オー
ジャパン(株)	(株)大菱
(株)	(株)岡崎
ヤマ	(株)岡村製
アールテック	(有)岡本
システムズ(株)	(有)岡元
ソリューションズ	(株)オキナ
クノロジーズ(株)	(株)鬼塚
(株)	(株)オハ
イーティー	(株)オフ
T	(株)オブ
ス産業	オブティ
ピエフ	(有)オブ
ラボ	(株)オブ
(株)	(株)オブ
一電子	オプション
A	(株)オブ
Jテクノロジ	オブト
ジャパン(株)	(株)オブ
エヌ・ケー	オリエン
(株)	(有)オリ
・クルム(株)	オリンバス
・オフィクス・ジャパン(株)	カ
アンド・エー	カスケード
ンジニアリング(株)	(株)カツ
ーキン(株)	加藤電機
エフ回路設計ブロック	(株)カム
アイナイス(株)	華陽物産
ドバンステクノロジ(株)	川平電機
システム(株)	(株)川本
	(株)環境

所
キーテクノ(株)
キーナステザイン(株)
(株)キヨ一技研
北野精機(株)
キャノンアルバ(株)
(株)キャンドックシステムズ
キャベンラジャパン(株)
共栄通商(株)
京セラ(株)
(株)協同インターナショナル
(株)京都タカオシン
京都電機器(株)
協立電機(株)
共立電子産業(株)
(株)協和印刷
(株)共和電子製作所
協和ファインテック(株)
(株)共和溶材
旭光通商(株)
金属技研(株)
(株)きんでん
工藤電機(株)
クリアパルス(株)
(株)グリーンティック
(株)クリスタル光学
(株)クリハラント
(有)グルーラボ
(株)グローバルインフォメーション
グローバル電子(株)
(株)グローブ・テック
クロスフィールドバイオ(株)
グローリーシステムクリエイト(株)
(有)ケイ・サイエンス
(株)ケー・パック
KeV(株)
コアマイクロシステムズ(株)
(株)工苑
(株)光学技研
(株)光響
神津精機(株)
(株)興電社
(株)鴻池組
神島化学工業(株)
(株)神戸製鋼所
向洋電機(株)

(株)コーガアイソトープ
コーンズテクノロジー(株)
(株)小坂研究所
コスマ・テック(株)
コトブキ精密(株)
寿鉄工(株)
コヒレント・ジャパン(株)
(株)コベルコ科研
コミヤマエレクトロン(株)
(株)コムクラフト
(株)コメッツ
コンピュータ・システム(株)
コンピュータダイナミックス
さ
(株)サートンワークス
(株)サイエンス・サービス
サイエンスプラス(株)
(株)サイエンスラボラトリー^リ
(株)サイエンティックス
斎久工業(株)
(有)斎藤商店
サイバネットシステム(株)
サエス・ゲッターズ・エス・ピー^リ
(株)栄興業
阪本(株)
佐藤精機(株)
サトーシステムサポート(株)
サワダ精密(株)
サンインツルメント(株)
三栄技研(株)
(有)サンカッティング
三機工業(株)
三協電子部品(株)
山九プラントテクノ(株)
(株)三啓
サンコー(株)
サンゴバン(株)
(株)三笑堂
(株)サンテム
(有)サンプラス
サンリオオートメイション(株)
サンレイエンジニアリング(株)
(株)シーアイ工業

ジーエスアイ・グループ・ジャパン(株)	(有)スマート・ラムズ
(有)ジー・エヌ・ディー	住友大阪セメント(株)
シーズシー(有)	住友重機械工業(株)
シーマ電子(株)	住友重機械ファインテック(株)
(株)ジーン・コヒーレント	住友商事(株)
J X 日鉄日石金属(株)	住友電設(株)
J F E コーメック(株)	スリースイ(株)
(株)ジェイティック	駿河精機(株)
ジエンティック(株)	セイコー・イージーアンドジー(株)
(株)ジオシス	誠南工業(株)
シグマ光機(株)	西播科学(株)
シグマテック(株)	西部電気建設(株)
(株)システムポート筑波	ゼネラル物産(株)
システムクス(株)	(有)センソファージャパン
島津サイエンス西日本(株)	セントラル薬品(株)
(有)清水商会	ソーラボジャパン(株)
(株)シミュラティオ	(株)ソフテック
(有)ジャスティー	た
シャランインツルメンツ(株)	大栄無線電機(株)
シユロフ(株)	(株)大起
翔荣システム(株)	(株)ダイキンアプライドシステムズ
(株)昌新	ダイキン工業(株)
(株)城南製作所	(株)大興製作所
昭和オブトロニクス(株)	(株)大成化研
(株)シルバコ・ジャパン	(株)大電社
(株)城山	ダイトイエクトロン(株)
(株)進映社	ダイトイデンソー(株)
信越化学工業(株)	ダイトイロンテクノロジー(株)
(株)新開トランスポートシステムズ	(株)大洋バルブ製作所
真空光学(株)	(株)大和テクノシステムズ
(株)伸興	(株)ダウ
(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンス	(株)高木商会
新光電子(株)	(株)高木製作所
(株)シティック	(株)高砂製作所
新東工業(株)	(株)タキモト
新日本空調(株)	竹田理化工業(株)
(株)新陽製作所	(株)竹中工務店
水 i n g (株)	(株)辰巳鉄工
(株)鈴木商館	タツミ産業(株)
(株)スタック	田中光化学工業(株)
(株)スナミ	多摩川精機販売(株)
スプリングエイトサービス(株)	タレスジャパン(株)
スペクトラ・フィジックス(株)	(株)ダン・タクマ

ネットワンシステムズ(株)	姫路電機材料(株)
のぞみ(株)	姫路ナブコ(株)
(株)ノダRFテクノロジーズ	(株)ヒメプラ
は	檜山工業(株)
バイオニア精工(株)	(株)ヒューマニティ
(株)ハイテック	(株)ヒューリンクス
(株)ハイロックスジャパン	(株)枚方技研
伯東(株)	広瀬化学薬品(株)
パシコ貿易(株)	(株)ファーストメカニカルデザイン
(株)パシフィックテクノロジー	ファイブラボ(株)
(株)バスカル	ファイン・インテリジェンス・グループ(株)
(株)バスコ	(有)ファインテック
長谷川塗装(株)	(株)ファンナティック
(有)パックス	V A T(株)
(株)パックス・エスイープイ	V Gシエンタ(株)
(有)パッケージングテクノロジー	(株)フェローテック
発穂電機(株)	フォトテクニカ(株)
(株)服部	フォトプレシジョン(株)
(株)ハナムラオブティクス	福電(株)
(株)ハマナカ	福西電機(株)
浜松ホトニクス(株)	(有)藤アイデック
原田産業(株)	藤井光学(株)
(株)原マシナリー	藤倉商事(株)
バルカー・ガーロック・ジャパン(株)	富士ケミカル(株)
(株)バルスパワー技術研究所	(有)フジ精工
(株)バルテック	富士通(株)
(有)パロックインターナショナル	(株)フジ・データ・システム
(株)播新設備	富士電機(株)
(株)ハンテック	フジトク(株)
ピアーオブティクス(株)	(有)船引工業所
(株)ピーアイシステム	ブネウム(株)
ピーアイ・ジャパン(株)	芙蓉総合リース(株)
(株)ピート・ジェイ	フラクシ(株)
(株)ビートシステムサービス	フルウチ化学(株)
(株) BeeBeans Technologies	古河電気工業(株)
日置電機(株)	(株)ブルックマンテクノロジ
(株)光コム	(株)フルヤ金属
光貿易(株)	(株)ブレイン
日立アロカメディカル(株)	(有)ブロードバンド
日立協和エンジニアリング(株)	(株)ブロリンクス
日立金属(株)	(同)フロンティア・アライアンス
日立金属アドメット(株)	ヘキサゴン・メトロジー(株)
(株)日立建設設計	ヘルツ(株)
日立造船(株)	(株)ヘルヴェチア
日立電線(株)	ベンギンシステム(株)