

レーザーによる濃縮技術

Atomic Vapor Laser Isotope Separation (AVLIS)

阿部 素久
ABE Motohisa

木村 博信
KIMURA Hironobu

石戸谷 健司
ISHITOYA Kenji

同位体を分離し濃縮する技術の一つである、レーザーによる濃縮技術(AVLIS: Atomic Vapor Laser Isotope Separation)を開発している。この技術は、従来の濃縮技術に比較し経済性の高い技術であり、将来、ウラン(U)濃縮やガドリニウム(Gd)濃縮などにも適用が期待される。この技術には、高速・高繰返してパルス動作し、大出力で、かつ、特定の波長に制御された高精度なレーザーが必要となる。

当社は、これらの機能を満たすシステムとして、銅蒸気レーザー(CVL: Copper Vapor Laser)と色素レーザー(DL: Dye Laser)の開発を推進し、世界最高レベルであるCVL増幅出力2.4 kW, DL増幅出力542 Wを達成し、この技術の実用化見通しが得られた。今後は、システム全体としての性能評価が行われる予定である。

Atomic vapor laser isotope separation (AVLIS) technology is expected to be a more economical method, in terms of both capital and operating costs, compared with conventional gas diffusion and gas centrifuge enrichment. AVLIS technology will be applied not only to uranium but also gadolinium enrichment, which will have economic merit in light water reactor (LWR) operation. Technological development for its practical application is under way.

A copper vapor laser (CVL) pumped dye laser (DL) system, in which both of the lasers are high-power, high-repetition-rate pulsed lasers with precise frequency stability, has been developed for the AVLIS program in Toshiba. A CVL maximum output power of 2.4 kW has been successfully achieved in a master oscillator power amplifier (MOPA) configuration. A DL output power of 542 W has been demonstrated in long-term operations exceeding 200 hours.

This laser system will be applied at a demonstration facility in Tokaimura for a trial of industrial-scale uranium enrichment.

1 まえがき

同位体分離法としては、同位体種による分子量の違いを利用した“統計的分離法”と、特定の同位体だけを選択的に分離濃縮する“選択的分離法”とがある。前者には、U濃縮用として現在実用化されているガス拡散法、遠心分離法があり、後者にはレーザーによる濃縮(以下、レーザー濃縮と略記)が挙げられる。

レーザー濃縮は、統計的分離法に比較し、大きな分離係数が得られるため、経済性が高く次世代の濃縮技術として開発されており、将来、U濃縮のほか、炉特性改善を目的としたGd濃縮などへの適用も期待できる。

わが国においては、U濃縮技術開発を目的として1987年に設立された電力会社主体のレーザー濃縮技術研究組合⁽¹⁾の主導で開発が進められた。92年の工学実証試験(実験機試験)を成功裏に終了し、その後の実用プラント構成機器の要素技術開発を経て、現在、プロセス実証試験に向けての準備が進行中である。この試験は、レーザーシステムと分離装置の総合試験で、これまでの開発研究の集大成とも言うべきものである。当社は、レーザー濃縮技術研究組合に協力し、レーザー濃縮の分離プロセスの解明とレーザーシステムの開発に取り組んでいる。

レーザー濃縮は、複数の同位体元素を含んだ原子に特定波

長のレーザービームを照射し、分離対象の同位体だけを選択的に励起、電離して濃縮する方法であり、実用化のためには、大出力・高精度レーザーシステムが必要とされる。

ここでは、レーザー濃縮技術の適用先の一つであるU濃縮について、その原理を説明するとともに、上記条件を満足するCVLとDLを用いたレーザーシステムの開発成果及び今後の展開について述べる。

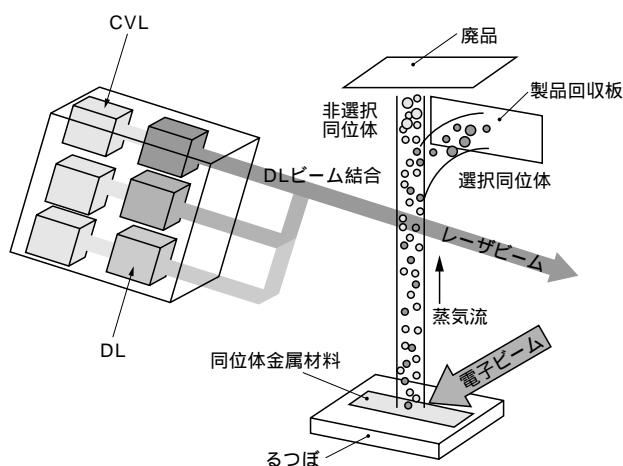


図1. 原子レーザー法濃縮システムの構成 原子蒸気にレーザー光を照射し、特定同位体を選択的に励起・電離する。

Configuration of atomic vapor laser isotope separation (AVLIS)

2 レーザ濃縮技術の概要

2.1 レーザ濃縮技術の原理と装置構成

レーザによるU濃縮は、真空容器内で発生させた金属U蒸気に、²³⁵Uだけを選択的に励起・電離するレーザ光を照射し、生成したイオンを回収板にて電氣的に回収して低濃縮Uを得るものである。一般的なレーザ濃縮システムの概略構成を図1に示す。構成要素としては、レーザシステムと分離装置とに大別される。

Uの原子蒸気は、分離装置内のろつぼに入れた金属Uを電子ビームで高温(3,000 K以上)に加熱することによって生成する。このU蒸気が濃縮U回収板を通過する前に、U原子中の²³⁵Uの光吸収波長だけに正確に同調されたレーザを照射する。U原子の電離ポテンシャルは約6 eVであるため、約2 eV(波長換算：約600 nm)のエネルギーを持つ可視光による励起では、3段階の共鳴励起(選択励起、中間励起、電離)でU蒸気中の²³⁵Uだけを選択的に電離させることができる。この光電離によって生成された²³⁵Uイオンは、電氣的に濃縮U回収板上に回収され、電離されないU原子(主として²³⁸U)は劣化Uとして劣化U回収板に回収される。

このため使用するレーザには、約600 nmの可視領域で波長を可変でき、²³⁵Uだけを選択的に分離できるだけの十分に狭い波長幅を持つことが要求される。更には、高速のU蒸気流を効率よく電離させるため、このレーザには高出力・高繰返しのパルス発振動作が必要となり、波長を精度良く維持しながら、1 kW以上の平均出力のパルス光を発振するという極めて高度な技術が必要である。

このような機能を満たすレーザシステムとして、可視光のCVLを励起光源とした波長可変レーザであるDLの開発が進められている。

2.2 レーザ濃縮用レーザシステムの概要

レーザ濃縮用レーザシステムを概念を図2に示す。システムは、複数ラインのCVL増幅システム(CVL-MOPA: Master Oscillator Power Amplifiers)とCVLにより励起される複数ラインのDLから構成される。

CVLは、可視域の高出力レーザで、パルス発振繰返し数は、4~6 kHz、パルス幅は約50 nsである。CVL-MOPAは、高出力化するために発振器と複数の増幅器を直列に連結したものであり、DLは、これらの出力を励起光としている。また、DLへの励起光の伝送には、光ファイバを用いて安定した供給を可能としている。DLに必要な20 kHz以上の高繰返し化についても、この光ファイバデリバリーシステムを用いている。

DLは、CVLと同様のMOPAによって高出力化を図っている。発振器は、主に発振波長の制御を担っている。このレーザの最大の特長は、使用する色素の蛍光領域から任意の波長を選択することができることで、レーザ濃縮では550~

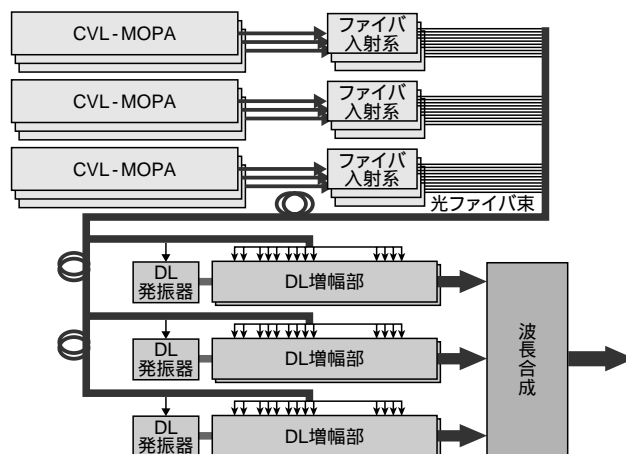


図2. レーザシステムの概念 CVL-MOPAとDL-MOPAにより構成される。

Concept of copper vapor laser pumped dye laser system for AVLIS

650 nmがその選択域となる。

以下に、CVLとDLの概要及び開発成果について述べる。

3 レーザ装置の概要と開発成果

3.1 CVL⁽²⁾⁻⁽⁴⁾

CVLは銅の蒸気をレーザ媒質とする特殊なレーザで、可視域(510 nm緑色と578 nm黄色)で発振する高出力・高繰返し発振が可能な放電型パルスレーザである。

CVLの構造原理を図3に示す。

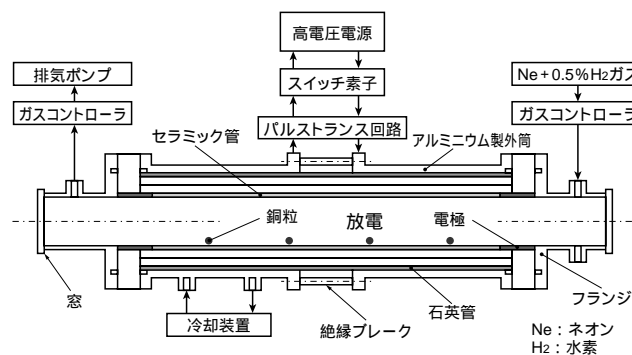


図3. CVLの構造 銅の蒸気をレーザ媒質とし、可視域(510 nm, 578 nm)で発振する放電型パルスレーザである。

Structure of copper vapor laser

レーザ管の両端に設けた電極間に高電圧パルスを印加し、レーザ管内にパルス放電を起して、外周の断熱材により管内温度を1,500 程度まで上昇させ、レーザ管内に設置した銅を蒸発させると同時に、銅原子を電子衝突励起・発振

させる。レーザ管を覆っている断熱材の外周は、水冷ジャケットにより冷却されている。

3.1.1 CVLの設計方法 CVLの出力は、放電部の体積に比例して増加することが予想されるので、放電部の長尺化及び大口径化により単機出力の向上を図った。このためには、放電及び励起に必要なエネルギーを効率良くレーザ管に注入し、できるだけ大きな体積内に最適な銅蒸気密度を得ることが必要である。そのため、レーザ管内のプラズマ抵抗を考慮した放電回路の計算モデルによる解析を行い、実験値と対比することによって、より効率的な電気回路設計を可能とした。また、レーザ管内の熱平衡、窓部へのふく射伝熱の数値解析により管内温度分布が精度良く予測され、有効放電体積増加のための断熱材の改良によるレーザ管軸方向の温度均一化の設計に反映できた。

3.1.2 CVLの試験結果 CVLの発振出力は、放電体積の増加によってほぼ直線的に増加し、口径90 mm、レーザ管放電長3,500 mmを持つ増幅器により、増幅能力として最高出力650 Wが得られた。また、1,000時間の運転試験を行い設計値どおりの出力(600 W)をほぼ維持でき、長時間安定した運転性能を確認した。更に、レーザ発振器として小型CVL 2台を用い、高いビーム指向性が得られる注入同期型発振器構成を採用し、前記のCVL増幅器4台を直列に配置したCVL-MOPA⁽⁵⁾の出力として、最高出力2.45 kWを達成した。

これらの出力は、世界最高レベルである。CVL-MOPAの外観を図4に示す。



図4 .CVL-MOPA 1台の発振器と4台の増幅器が直列に配置され、高出力を達成している。
Copper vapor laser MOPA system

3.2 DL⁽⁶⁾

DLはレーザ媒質として、複雑な化学構造を持った色素をアルコールに溶解させた液体を使用し、可視部を中心とした波長域を連続的に同調できる特色がある。DLは、発振波

長を制御し、同時に狭帯域化する発振器と、大出力化するための多段の増幅器から構成される。また、励起源であるCVLの出力は、光ファイバによって各増幅器に伝送され、安定な出力性能が得られている。DLの外観を、図5に示す。

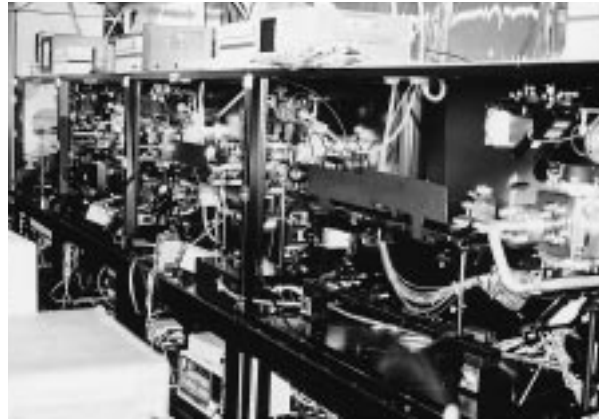


図5 .DL-MOPA 1台の発振器と複数の増幅器が直列に配置され、高出力を達成している。
Dye laser MOPA system

3.2.1 DL発振器 DL発振器は、パルス発振のヘンシユ(発明者名)型であり、共振器内に波長選択素子を挿入してスペクトル幅を狭帯域化し、これら波長選択素子を同調させながら駆動することで、レーザ濃縮に必要な100 MHz以下の線幅のシングルモード発振と、100 MHz以下の安定度を実現している。

シングルモード発振を得るための波長選択の概念を図6

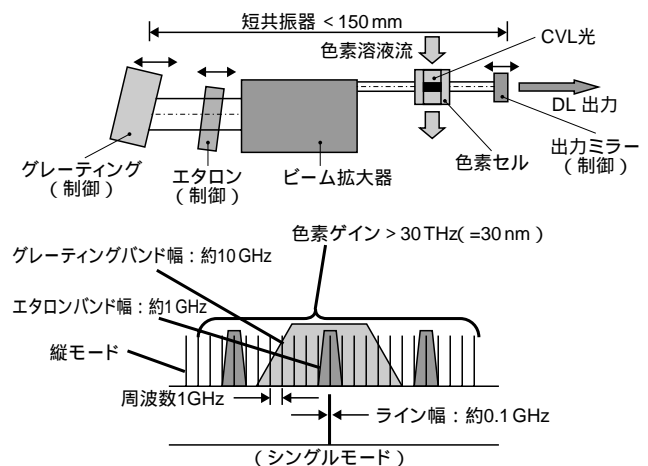


図6 .波長選択素子によるシングルモード発振 共振器中に波長選択素子であるグレーティング、エタロンを挿入し、シングルモード化を実現した。

Single mode selection by grating and etalon

に示す。シングルモードを得やすくするために共振器長をできる限り短くし、縦モード間隔を広げることが必要となる。共振器内のプリズムを最少個数で構成したビーム拡大方式により共振器長を短縮し、縦モード間隔1 GHz以上を得た。これによって、波長選択素子であるグレーティング(回折格子)、エタロン(etalon)を用いて、シングルモード発振を可能とした。

また、波長の安定性については、構成光学素子の温度変化などによる変動量を極力小さく抑えることが必要である。温度変動を ± 0.01 の範囲に抑えるための温度制御と、温度による位置変動をキャンセルするような制御系を適用し、かつ熱膨張係数の小さなスーパインバー(ニッケル合金)材料を採用することなどにより、高度な波長安定性を得ることができた。

3.2.2 光ファイバ伝送システム DLの出力変動の主要因である励起光の出力及び光軸変動を抑制することを目的として、CVL-MOPAの出力は、複数本の光ファイバによりDLへ伝送される(図2を参照)。そのために、いかに効率良く光ファイバに励起光を入射し、DLの増幅部を構成する色素セルに出射するかが課題となる。

当社が開発したCVL-MOPAの出力を、光ファイバへ入射する光学系を概念図7に示す。CVL-MOPAの出力は、光ファイバの損傷耐力などの点から複数本の光ファイバに分割する必要がある。そのため、2組のレンズアレイを用いて、光ファイバに入射する方式とした。

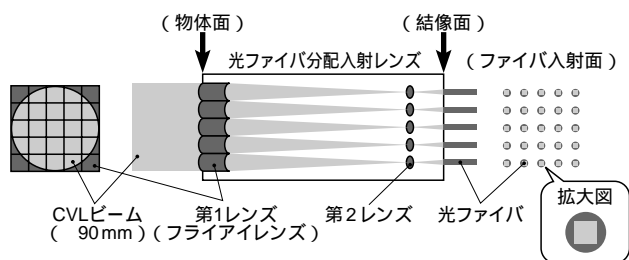


図7. 光ファイバ入射光学系概念 2組のレンズアレイを用いて、CVL出力を複数の光ファイバに分割、入射する。
Concept of fiber injector

また、光ファイバの出力をDL増幅器に入射するための光ファイバ出射系の概念を概念図8に示す。複数本の光ファイバから出射されたレーザー光は、カライドスコープと呼ばれる光学系で出力密度を均一化し、レンズで色素レーザー増幅器に必要な形状に集光される構造となっている。これらを採用することによって、光ファイバによる励起光の伝送が可能となった。

3.2.3 DL増幅器 DL増幅器の概念を概念図9に示す。アルコールに色素を溶解した色素溶液は、石英製の色素セル

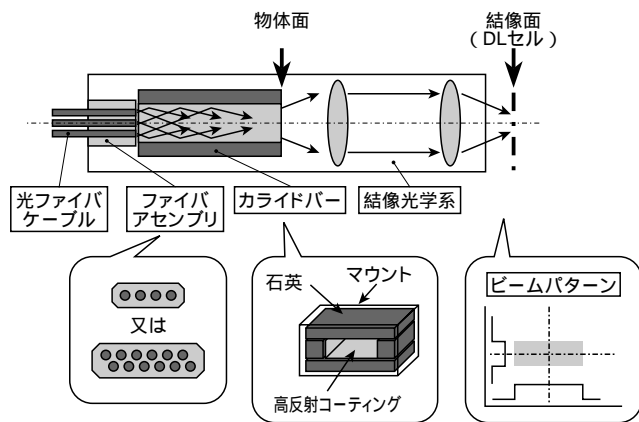


図8. 光ファイバ出射光学系概念 複数の光ファイバから出射されたレーザー光は、カライドスコープを経て、DL増幅器に集光される。
Concept of fiber-to-amplifier relay

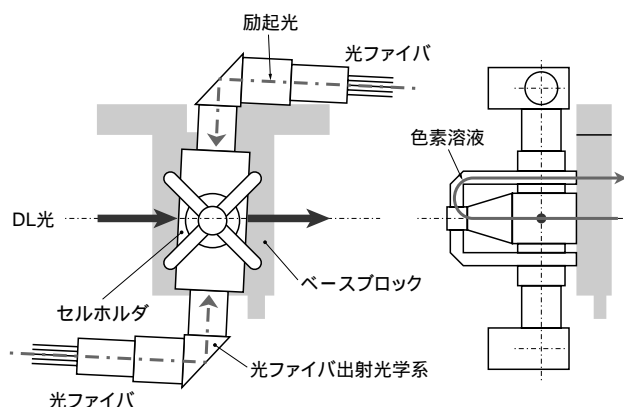


図9. DL増幅器概念 DL発振器から出力されたレーザー光は、複数のDL増幅器により高出力化される。
Concept of dye laser amplifier

内を流れ、その流れの直角方向から光ファイバ伝送された励起光が照射される。その線状に照射される励起光と時間的、空間的にマッチするように発振器、又は前段の増幅器から出射されたレーザー光が導光され増幅される構造となっている。DL増幅器の出力特性を最適化するため、色素の吸収断面積、誘導放出断面積などを基に、入出力特性を計算する設計コードを開発し、実験値と対比することによって、より効率的な増幅設計を可能とした。また、色素セル内の色素溶液の流速は数10 m/sとなるが、流速分布が均一となるよう三次元流動解析による流路設計の最適化を図った。

3.2.4 DLの性能評価 以上の要素技術を組み合わせたフルシステムでのDLの性能評価試験を行い、出力特性、変換効率、波長安定性などを評価した。

図10は、励起光(CVL)の入力に対するDLの出力及び変換効率を示したものであり、励起光入力1,140 Wの条件で、DLの最高出力542 W、変換効率47.5%を達成した。また、

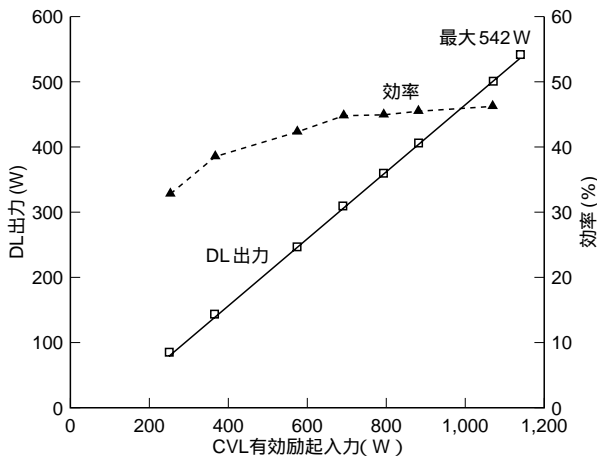


図 10 . DLの出力及び効率 DLの出力は、励起光 (CVL) の入力に依存し増加する。

Output power and conversion efficiency of dye laser system

200 hの長時間運転試験を行い、DL平均出力500 W、波長安定性 ± 100 MHz以内を達成することができた。

4 今後の展開

これまで述べた開発成果を表1にまとめて示す。レーザー濃縮技術研究組合において、2002年に分離装置との組合せによるレーザー濃縮システム全体での機能評価が計画されており、これをもってレーザーシステムの性能検証を行うことが、当面の目標である。

また、レーザー濃縮は、他の分離法に比較し経済性に優れた方法であり、有用同位体の分離技術への応用などについても検討を進めていく。

表 1 . CVLとDLの開発目標と成果

Projected targets and achieved performances of CVL and DL

開発項目		目標	成果
CVL	単機増幅出力 (W)	600	650
	MOPA出力 (kW)	2.4	2.45
	繰返し数 (kHz)	4.4	4.4
	長時間運転 (h)	1,000	> 1,000 (積算)
DL	MOPA出力 (W)	500	542
	変換効率 (%)	> 40	> 45
	繰返し数 (kHz)	4.4	4.4
	ライン幅 (MHz)	100	< 100
	波長安定性 (MHz)	± 100	± 30
	ASE含有量 (%)	< 1	< 1
長時間運転 (h)	200	> 200 (積算)	

ASE : Amplified Spontaneous Emission

5 あとがき

当社は、レーザー濃縮技術の適用先であるU濃縮用のレーザーシステムの開発を行い、これまでに実用化レベルの性能を達成することができた。これらの技術を駆使して、レーザーシステムと分離装置との組合せによるプロセス実証試験に注力していくとともに、これらの技術の応用展開を図る所存である。

謝 辞

レーザー濃縮用レーザーシステムの開発にあたり、ご指導、ご協力いただいたレーザー濃縮技術研究組合の関係各位に深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) 森岡 昇 . 原子法レーザー濃縮の機器開発について . レーザー学会研究会報告 . RTM-88 , 1988 , p.1 - 6.
- (2) Kimura , H. , et al . Development of 200 W High-Performance Copper Vapor Laser with 6 cm Diameter , 300 cm Length. J . Nucl . Sci . Tech. , 31 , 1996 , p.34 - 47.
- (3) Kimura , H. , et al . Long Life Operation of Copper Vapor Laser. Rev . Laser Eng. , 23 , 1995 , p.210 - 219.
- (4) Kimura , H. , et al . Improvement of the lasing performance of copper vapor laser by adding Sc atoms as energy donors. Appl . Phys . Lett. , 71 , 1997 , p.312 - 314.
- (5) Kimura , H. , et al . " Development of high power copper vapor laser system " . Proc . SPIE . High-Power Lasers in Energy Engineering . Osaka , 1999 - 11 , SPIE . 1999 , p.550 - 561.
- (6) Konagai , C. , et al . " Development of high power dye laser chain " . Proc . SPIE , High-Power Lasers in Energy Engineering . Osaka , 1999 - 11 , SPIE . 1999 , p.243 - 252.



阿部 素久 ABE Motohisa

電力システム社 原子力事業部 礫子エンジニアリングセンター 原子力開発設計部主査。原子レーザー法ウラン濃縮技術開発のプロジェクト業務に従事。

Isogo Nuclear Engineering Center



木村 博信 KIMURA Hironobu

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 機器・システム開発部主査。レーザー応用分野の研究・開発に従事。レーザー学会、原子力学会、分光学会、応用物理学会、プラズマ核融合学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



石戸谷 健司 ISHITOYA Kenji

ディスプレイ・部品材料社 電子管・デバイス事業部 電子管技術部主務。原子レーザー法ウラン濃縮技術用銅蒸気レーザー及び色素レーザーの設計・開発に従事。

Electron Tubes & Devices Div.