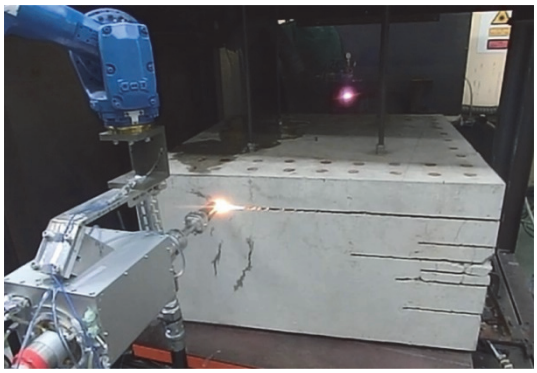
高出力レーザを用いたコンクリート建屋解体技術の開発

Development of Thick Concrete Cutting System Using High-Power Laser



呉屋 真之*1 Saneyuki Goya
森 宏樹*2 Hiroki Mori
奥田 剛久*2 Takehisa Okuda
藤谷 泰之*3 Yasuyuki Fujiya
下鍋 典昭*4 Noriaki Shimonabe
赤羽 崇*5 Takashi Akaba

近年，レーザ発振器の高出力化・高品質化が進み，これまで適用対象外であった極厚板部材へのレーザ加工適用が進められている。本報では，高放射線領域である原子力建屋の遠隔解体技術確立を目的に，極厚コンクリート柱（最大板厚 1200mm）を対象とし，20kW を超える高出力ファイバレーザと超長焦点光学系を用いたレーザコンクリート切断について報告する。また，高出力レーザ加工で課題となる，切断対象物を貫通してきた高出力レーザ光を受光する技術として開発した，“水”を用いた新規ビームレーザダンパシステムの開発について報告する。

1. はじめに

東京電力株式会社福島原子力発電所の建屋は高放射線領域であり，作業者が現場で長時間の解体に従事することが難しいため，遠隔解体技術の開発が要望されている。建屋を構成する鉄筋コンクリートは，一般の解体で使用されるワイヤソー等の機械切断を適用した場合，噛み込みの発生が懸念されるため，レーザ加工のような非接触の切断技術の適用が望ましい。

レーザ切断技術はレーザ発振器の高出力化に伴い，加工能力が著しく向上している。レーザを用いたコンクリート切断の開発はこれまでも実施されていたが，メートル級コンクリートをレーザ切断した報告はない[(1),(2)]。今回，高出力レーザ発振器と当社独自の光学系（超長焦点光学系）とを組み合わせて，極厚コンクリート切断技術の開発に取り組み，板厚 1200mm の切断を実証した。

一方，レーザ切断は，安全性の観点から加工対象を貫通するレーザビームの受光装置（ビームダンパ）が必要であるが，高出力レーザ光に使用可能なビームダンパの開発報告はほとんどない。従来のビームダンパは，水冷による冷却機構が付いた金属板の使用が一般的であり，冷却水によりレーザで加熱された金属板を徐冷するが，高出力かつ高密度レーザでは，金属板が冷却される前に溶融してしまい，長時間使用が困難であることが課題であった。

そこで，コンクリートを切断後に，金属板で受光する前にレーザパワーを低減するため，“水”を用いた新コンセプトのビームダンパを検討し，試作した。水は赤外光を吸収するとともにミスト状にすることで，散乱させることができる。水を用いた新規ビームダンパは，従来のビームダンパと比較して，受光する金属表面でのパワーとパワー密度を大幅に低減（約2%）できることを確認した。

本報では，コンクリート建屋解体への適用を目的とし，高出力・高パワー密度レーザ光を用いた極厚コンクリートのレーザ切断技術と“水”を用いた新規コンセプトのビームダンパシステムに関す

*1 総合研究所製造研究部 主席研究員
*2 総合研究所製造研究部
*3 総合研究所製造研究部 主幹研究員
*4 原子力セグメント機器設計部 主席チーム統括
*5 原子力サービスエンジニアリング株式会社 技術開発部 主管

る報告を行う(図1)。

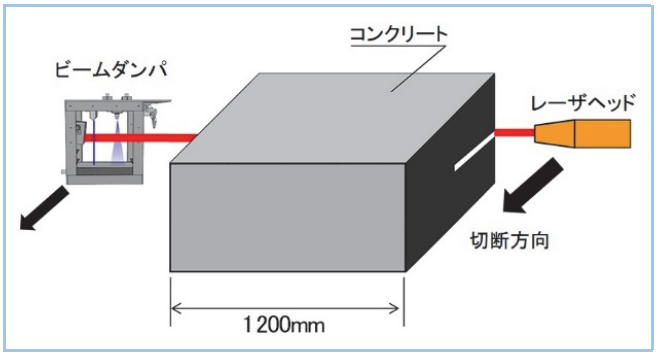


図1 高出力レーザを用いたコンクリート解体システム

2. 極厚コンクリート切断技術の開発

レーザ切断は，レーザによる熱で対象物を溶融させる切断方法で，同じ熱プロセスであるプラズマ切断やガス切断と比べて，金属，セラミックス，樹脂も切断可能で切断対象が限定されないことに加えて，高密度エネルギーのため，切断速度が速いことが特徴である。

レーザによるコンクリート切断の原理を図2に示す。レーザ切断は，絞って高密度化したレーザビームを照射してコンクリートを溶融させ，溶融したコンクリート(以下，ドロス)をアシストガスで吹き飛ばすことで切断が実現する。極厚コンクリート切断を実証するための課題は主に以下の2点である。

(1) 1200mm コンクリート厚さ方向全域での溶融に必要なレーザエネルギーの確保
(2) ドロスの除去

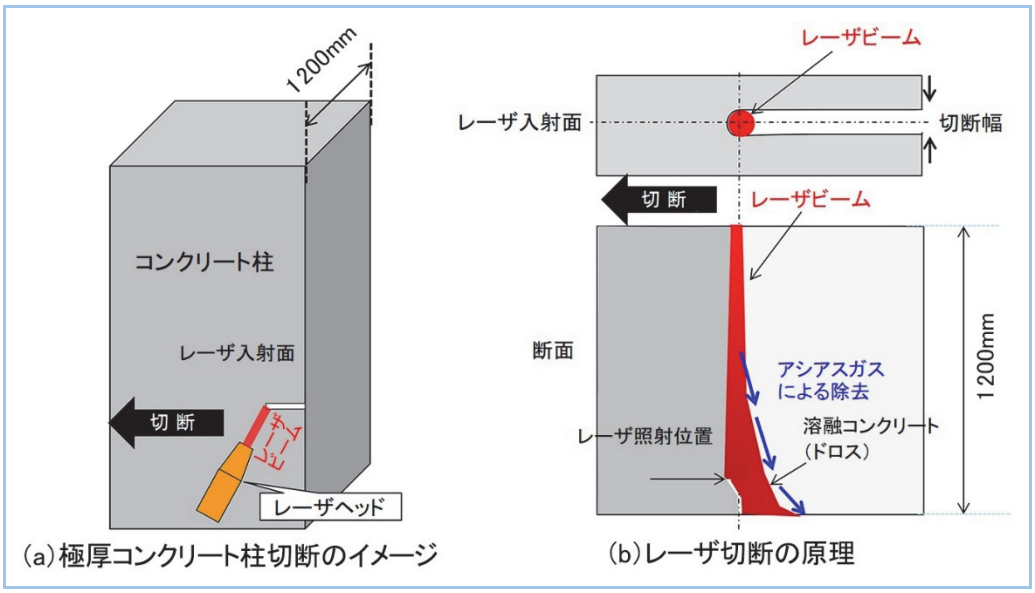


図2 レーザによるコンクリート切断の原理

焦点距離 500mm を有する集光光学系を用いて，切断速度一定(6，12mm/min)にて，レーザ出力を増大させてコンクリート切断試験を実施した(図3(a))。レーザ出力 20→25kW で切断速度が飽和する傾向を示し，切断板厚は約 900mm にとどまった。従来レーザ光学系(図3(b))は，極厚コンクリート裏面側でのビーム径が大きく広がるため，パワー密度が低くなり，コンクリート溶融に必要なエネルギーが維持できていないことが要因と推測される。そこで，コンクリート裏面でも十分なエネルギー密度が得られるよう超長焦点光学系を用いてコリメート光(図3(c))を形成し，コンクリート切断試験を実施した。レーザ出力の増大とともに切断板厚は厚くなり，レーザ出力 25kW にて板厚 1100mm まで切断することができた(図4)。

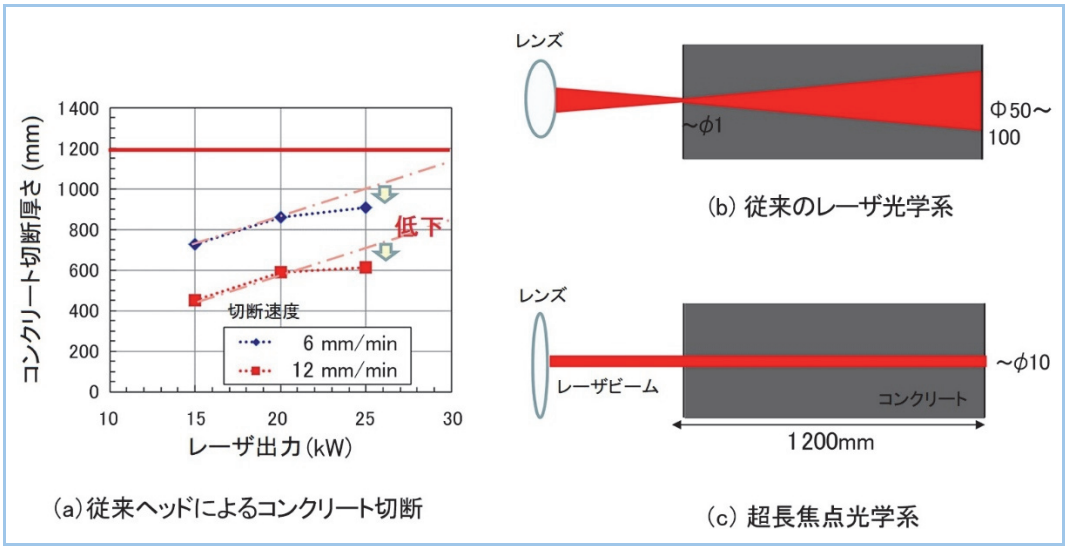


図3 超長焦点光学系の開発

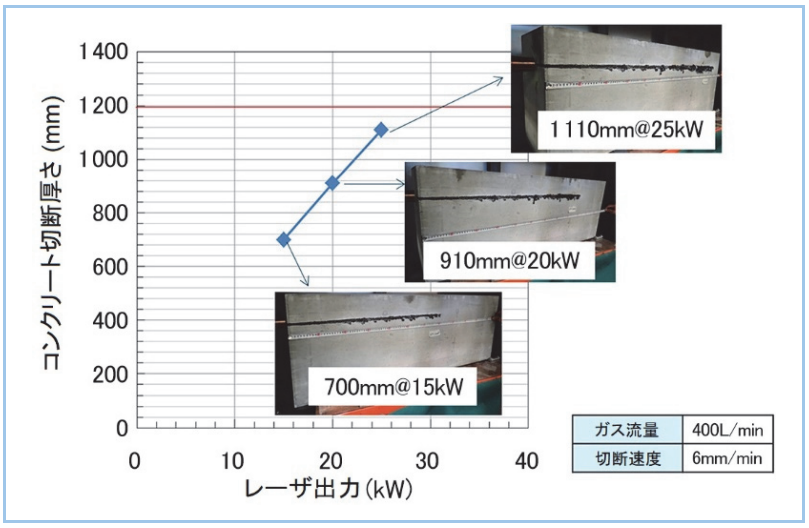


図4 レーザ出力と切断板厚との相関

次にドロスの効率的な除去を行うため，ガスノズルの改良を行った。従来のガスノズルでは，ガス流量3000L/minまでは切断板厚が厚くなったが，4000L/minまであげると逆に低下する傾向を示した(図5(a))。これは従来ガスノズル(図5(b))では，3000L/min以上で音速となり，速度が飽和してドロスの除去効果が頭打ちになるのに対し，ガス冷却の影響でドロス温度が低下して粘性が高くなり，流動性が低下したことによると推測される。そこで，ラバールノズル(図5(c))を用いて，流速が流量増大に従って音速以上に向上できるよう改善を行った。ラバールノズルを用いて極厚コンクリートの切断試験を実施したところ，ガス流量4000L/minで板厚1200mmのコンクリート切断を実証することができた(図6)。図7にレーザ出力25kWにて極厚コンクリート(板厚1200mm)を切断している様子を示す。

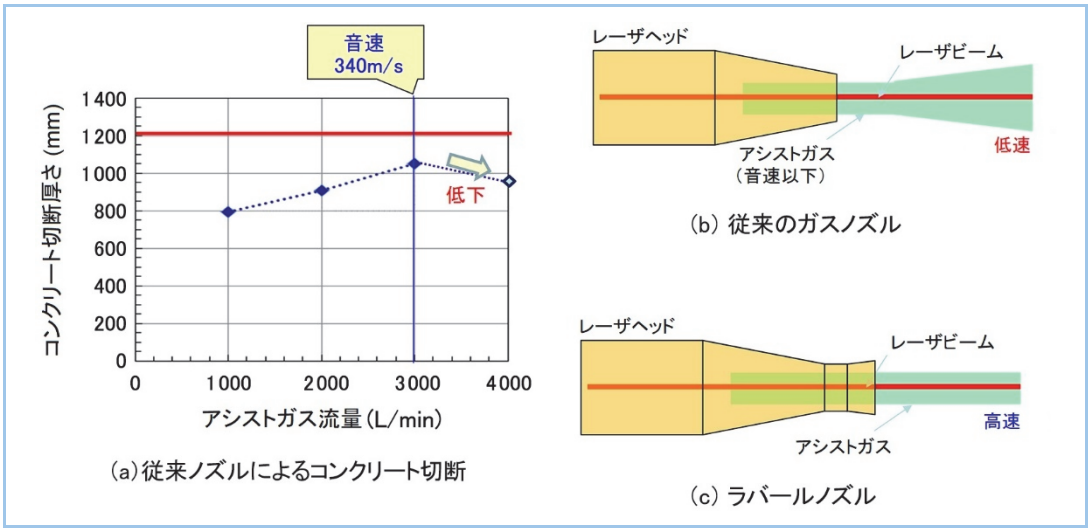


図5 ガスノズルの改良

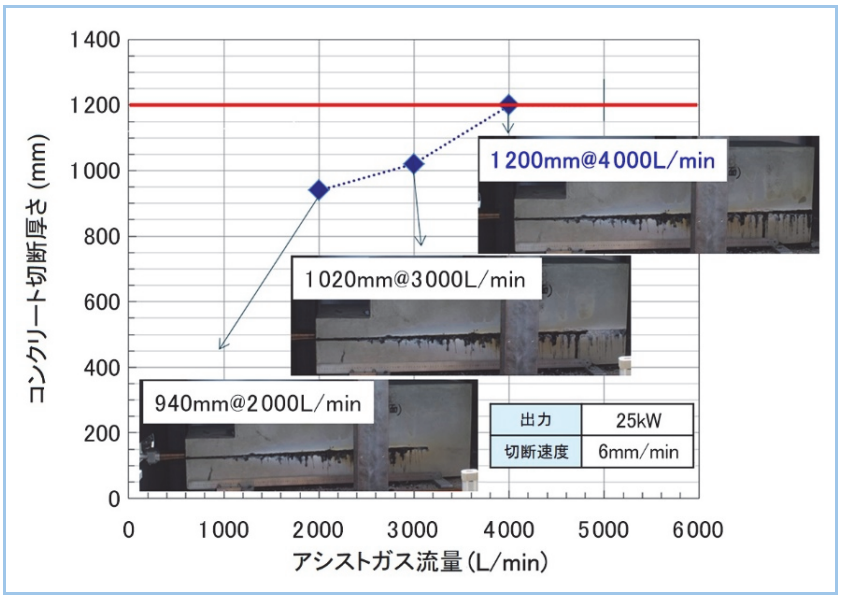


図6 ガス流量と切断板厚との相関

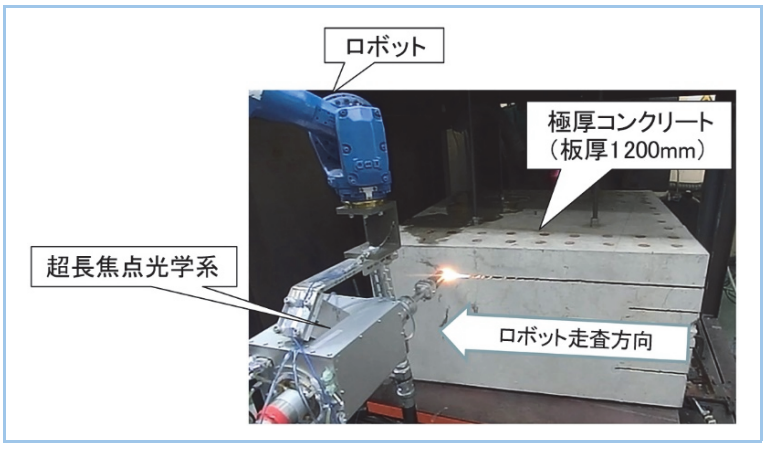


図7 極厚コンクリートのレーザ切断の様子

3. 水を用いた新規コンセプトのビームダンパ技術開発

図1に示した高出力レーザを用いたコンクリート解体システムの概要図のように，コンクリートが切断されると，レーザ光がコンクリートを貫通してくるため，安全に作業を行うには，貫通レーザ光を受光するビームダンパを設置する必要がある。図8に市販されているレーザ用のビームダンパの仕様（受光可能なパワー，及びパワー密度）マップを示す。パワーメータは，レーザパワー

30kW でも受光可能であるが，その際にレーザの受光面が溶融や焼けが生じないように，パワー密度は数 kW/cm^2 以下に押さえる必要がある。これに対して，極厚コンクリート切断で使用する超長焦点光学系では小径のビームとなり，ビームダンパ位置でのビーム径もφ10mm 程度と絞られている。このため，貫通するレーザは最大 25kW@ビーム径φ10mm となることが予想され，パワー密度も 32kW/cm^2 と非常に高くなり，現行製品では貫通レーザ光を受光することは困難である。そこで，極厚コンクリート切断のような高出力かつパワーレーザ光に適用可能なビームダンパとして，水を用いた新規コンセプトのビームダンパの検討を行った(図9)。

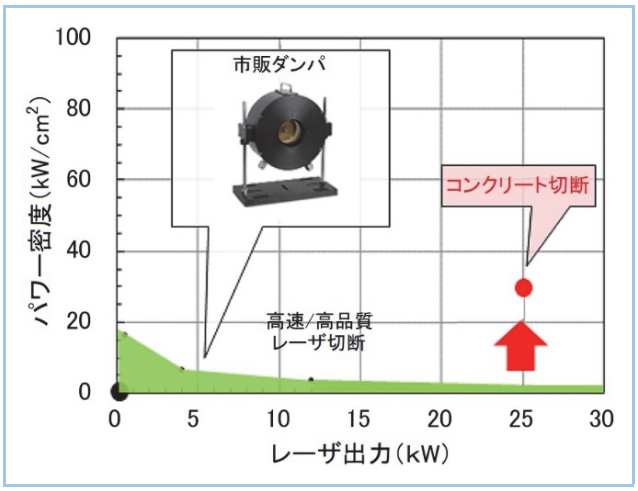


図8 ビームダンパに要求される仕様（パワー，及びパワー密度）

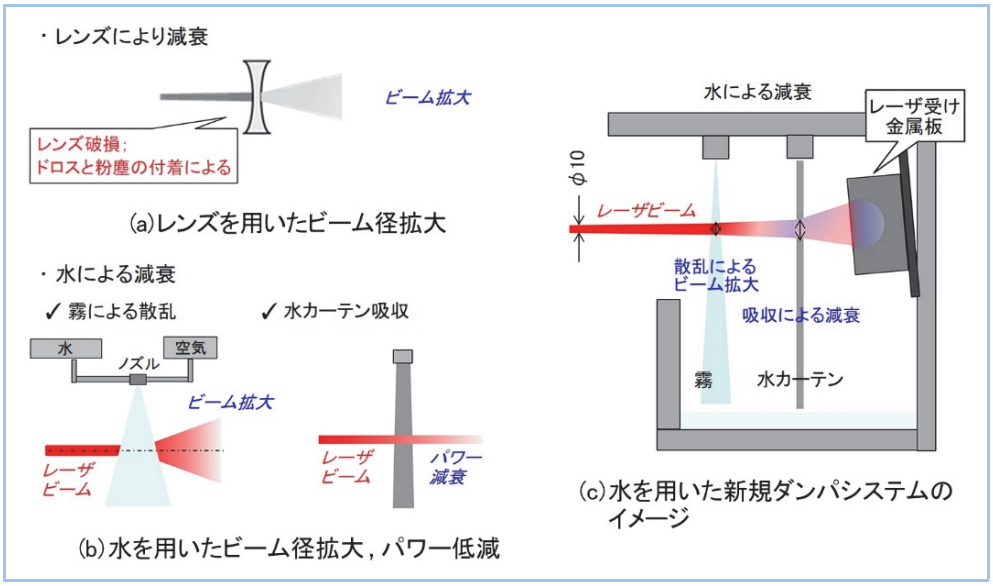


図9 水を用いた新規ダンパシステムのコンセプト

レーザ光を金属で受光するためには，パワー密度を数 kW/cm^2 以下に低減する必要がある。パワー密度を減衰する方法としてはレンズを用いてビーム径を拡大する手法(図9(a))が考えられるが，コンクリート切断で生じるドロスや粉塵がレンズに付着するとレーザを吸収して破損する恐れがある。そこで，水を霧状として霧のカーテンを形成し，レーザ光を散乱する手法を検討した。霧のカーテンは，ドロスや粉塵が入ってきても水で流すことが可能なため，連続して使用することが可能となる。また，赤外光は水で吸収されることから，水カーテンを形成してレーザ光を積極的に吸収し，パワーを減衰させることを考えた(図9(b))。

本研究では，パワー25kW かつパワー密度 30kW/cm^2 のレーザ光を金属板で安定して受光可能なように，“水の霧状カーテン”と“水カーテン”を組み合わせた新規ダンパシステム(図9(c))にて，パワー密度を 1kW/cm^2 以下に低減することを目標として開発を行った。

3.1 水カーテンによるレーザ光の吸収

初めに水カーテンを形成し，レーザ光の吸収率について評価した。使用するレーザはファイバレーザであり，レーザ光の波長は約1 μm である。レーザ光を水カーテンに照射すると，水表面での反射と透過，及び水による吸収が生じる(図 10(a))。ここで，レーザ光の水による吸収は(1)式で表される[3]。水表面の反射が約1％あり，水による吸収は水カーテンの厚みに依存する(図 10(b))。レーザ光を入射光の 10%までパワーを減衰させるには水カーテンの厚みを 11～12mm とすればよいことが分かる。ここでは，100W 級の低出力レーザ光を用いて評価した。

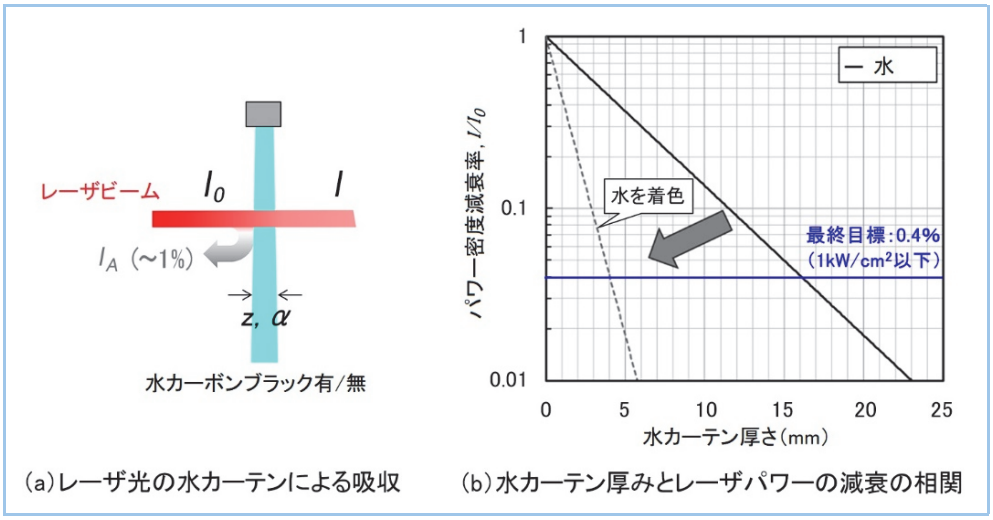
$I/I_0 = (1-IA)e^{-\alpha z}$ (1)

I ： 透過光　　I_0 ： 入射光

I_A : 反射光 (～1%)　　z ： 厚さ

α ： 吸収係数

レーザ光減衰システムの小型化の検討として，水を着色して吸収量増加させ，水カーテン厚みを薄くできるか検討した。図 10(b)の点線に示すように，水のみよりレーザ光の減衰能力が増加し，水のみの 1/3 の約 4mm でパワーを 10%まで減衰可能であることが確認できた。水カーテンによるレーザ光の吸収量は水カーテンの厚みで制御でき，また，着色することで吸収量を増大させることができる。着色材料については，レーザ光に対する耐性を考慮して選定する必要がある。



(a)レーザ光の水カーテンによる吸収　　(b)水カーテン厚みとレーザパワーの減衰の相関

図 10 水を用いたレーザ光の吸収

3.2 霧カーテンによるレーザ光のパワー密度減少

次に水をミスト状として用いる霧カーテンによるレーザ光の散乱効果を評価した。図 11 に水を用いた新規ダンパシステムのコンセプトを示す。霧は微小な水の粒子と空気で構成されており，空気とは異なる屈折率分布を有するため，霧の中をレーザ光が通過すると散乱が生じる(図 11(a))。光の波長により散乱されやすい粒子サイズがあることが知られているため，粒子サイズとパワー密度の減衰率との相関を調査した。ここで，パワー密度の減衰はビーム径の拡大を意味し，ビーム径を計測して算出した(パワー密度＝パワー／ビーム面積)。ここでは，100W 級のレーザ光を用いて評価を行った。

霧の粒子サイズは，霧カーテンを形成するためのノズルを取り変えて制御した(霧の粒子サイズ：5～200 μm)。霧の粒子サイズが小さいほどパワーが減衰する傾向を示し，粒子サイズ 5 μm で20%まで減衰することが確認できた。粒子サイズ 5 μm で霧カーテンの厚みと減衰率との相関を調べたところ，霧カーテン厚みが厚いほど減衰する傾向を示した。これらのことから，霧カーテンによるレーザ光の散乱は，水の粒子や霧カーテンの厚みにより制御することができることが分かった。

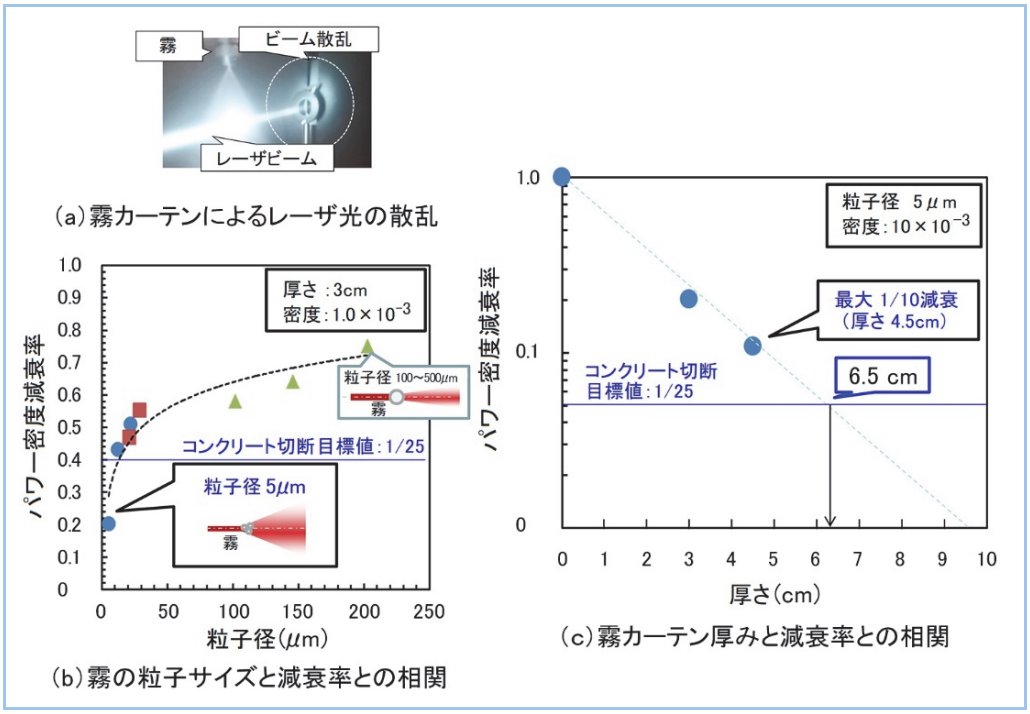


図 11 霧を用いたレーザ光散乱によるパワー密度低減効果

3.3 水カーテン＋霧カーテンによるレーザ光の減衰システム

水カーテンと霧カーテンの効果がそれぞれ確認できたため，組み合わせて水ダンパシステムを製作し，減衰効果を確認した(図 12(a))。前段に霧カーテンを入れ，後段に水カーテンを配置した。レーザ出力 25kW を入光し，パワー及びビーム径を計測してパワー密度の減衰を評価した(図 12(b))。この結果，霧カーテンではビーム径の拡大効果によりパワー密度が 70%減衰し，水カーテンでは 94%パワーが減衰でき，組み合わせることでパワー密度が 98%減衰と，入光時のパワー密度 32kW/cm^2(25kW@ビーム径 ϕ10)が 1kW/cm^2(目標値)まで低減することができた。

本開発により，高出力・高密度レーザを長時間，安定して受光可能なシステムを構築する見通しが得られた。

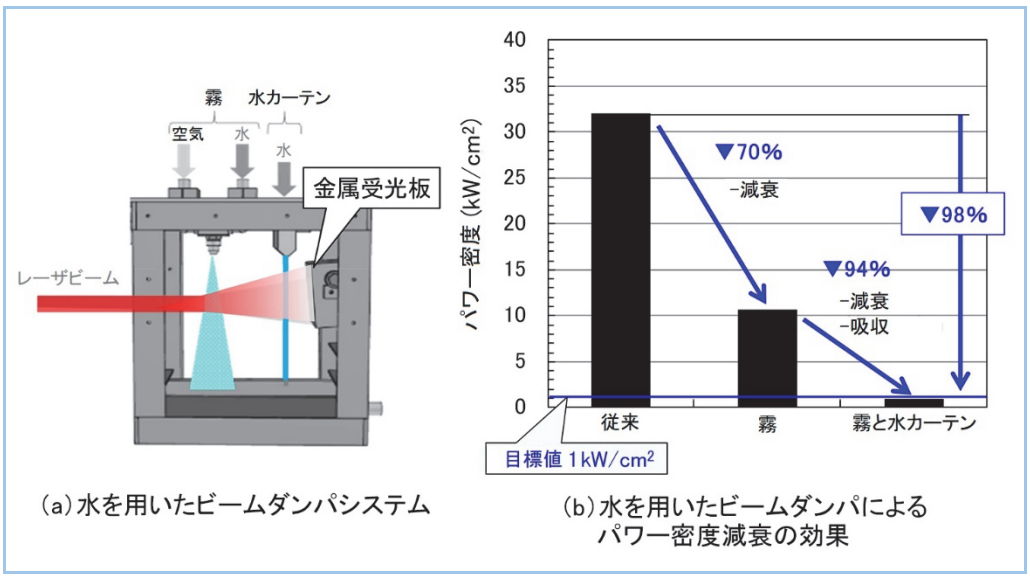


図 12 水を用いた新規ダンパシステムによるパワー密度減衰効果

4. まとめ

本研究では，コンクリート建屋解体への適用を目的に高出力レーザを用いた極厚コンクリート（板厚 1200mmt）の切断技術を開発した。また，解体システムを成立させる技術として，高出力かつ高密度パワーのレーザ光を受光可能な水を用いた新規レーザダンパシステムについてご報告した。コンクリート切断技術の開発では，高出力レーザ発振器と超長焦点光学系とを組み合わせることで板厚 1200mm のコンクリートを溶融可能な細長い高密度レーザとしてコリメート光を形成した。さらに，ラバールノズルの採用によってドロスを効率良く除去することが可能となり，板厚 1200mm の極厚コンクリートの切断を実証した。

また，高出力かつ高密度レーザ光の受光を可能とするビームダンパの開発では，水を用いた新規コンセプトのビームダンパを検討し，“霧状カーテンによるレーザ光散乱”と“水カーテン”よるレーザ光の吸収”を組み合わせたビームダンパを試作した。霧カーテンによりレーザ光を散乱させてビーム径を拡大することでパワー密度を 70％低減。加えて水カーテンによりレーザ光を吸収することで，更に 94％低減し，目標とするパワー密度 1kW/cm^2 以下を検証することができ，長時間安定して貫通レーザ光を受光な見通しを得た。

本技術は，原子力建屋の解体のみならず，一般建屋の遠隔解体や橋梁のコンクリート張替え工事にも適用可能な技術である。今後，本技術の適用を検討し，解体工事受注など，事業への貢献を図る。

参考文献

(1) 大出力レーザによるコンクリート切断に関する研究 その2，日本建築学会，大会学術講演概要集，1989
(2) レーザによるコンクリート切断研究，西松建設技報（1984）
(3) P. G. Felton et al, Proc.3 ICLASS (1982)