

レーザー核融合の研究開発と産業応用展開

浜松ホトニクス株式会社
中央研究所 産業開発研究センター センター長
川嶋 利幸
2021.3.17
電気通信大学 レーザー新世代研究センター
客員教授研究紹介

自己紹介

- 川嶋 利幸（59才 浜松市出身）
- 1985年電気通信大学物理工学科卒業
- 同年浜松ホトニクス株式会社入社
- 1997年～2010年大阪大学レーザー核融合研究センター（現レーザー科学研究所）に出向。2003年博士(工学)
- 現在中央研究所産業開発研究センター長



コロナ禍での自粛生活中に筋トレをしてスリムになりました。

目次

- 会社紹介
- 産業用レーザーを取り巻く近年の状況
- 半導体レーザー(LD)励起セラミックスレーザーの開発
- 大エネルギーレーザーパルスの産業応用
- まとめ

会社紹介

浜松ホトニクス株式会社（電気通信大学から約200km）

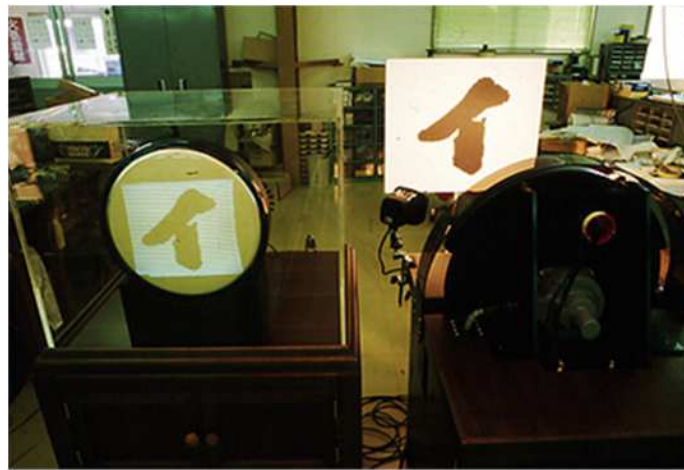
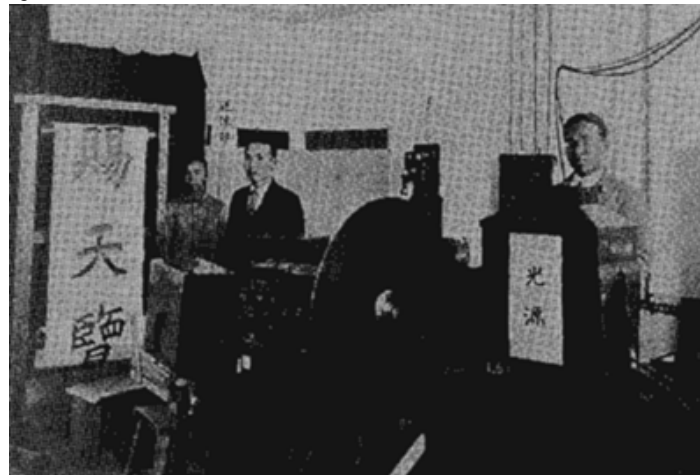


Copyright © google map

高柳健次郎 博士

1899年（明治32年） - 1990年（平成2年）

1926年12月25日浜松高等工業学校(現静岡大学工学部)においてブラウン管による電送受信に成功させた。
走査線40本によりイロハのイの字を表示させた。



1953年(昭和28年) 昔は皆ベンチャー企業だった(お蔵からスタート) HAMAMATSU PHOTON IS OUR BUSINESS

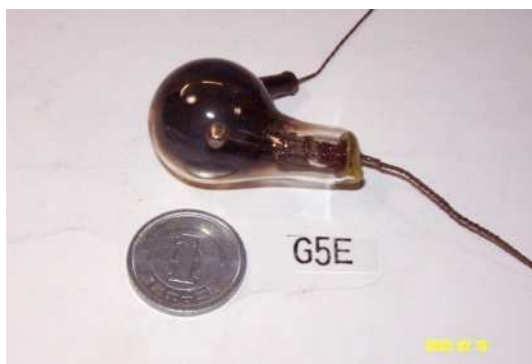
高柳先生の門下生がテレビジョンのような未知の分野・未踏の領域に挑戦するというスピリットを持って浜松テレビという会社を興した。



創業当初の浜松テレビ



創業当初の作業風景



現在の浜松ホトニクスの姿 ~ 事業部構成 ~

固体事業部



システム事業部



電子管事業部



レーザ事業推進部



中央研究所

中央研究所 産業開発研究センター



産業開発研究センター（私の職場）

浜名湖

Area:193,000m²

第1研究棟

管理棟

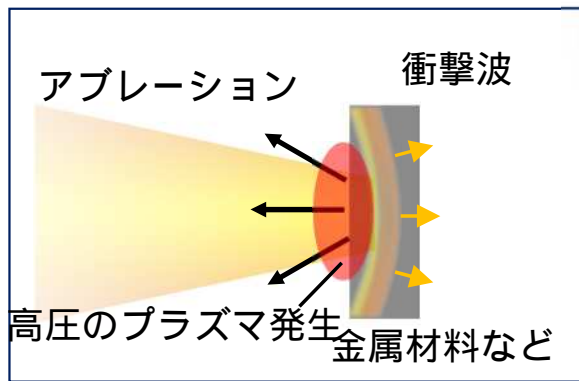
講演ホール

光産業創成大学院大学

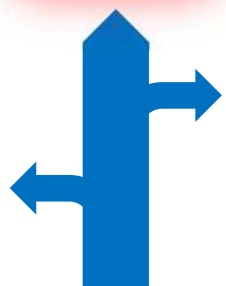


産業開発研究センターの主な研究開発内容

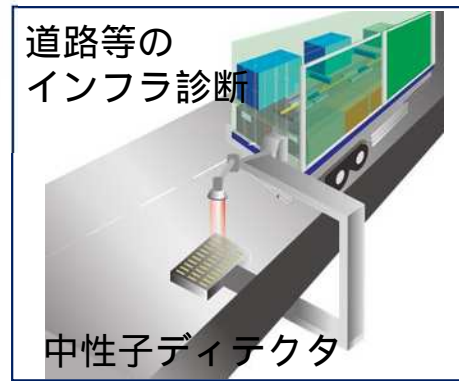
レーザー加工



産業利用

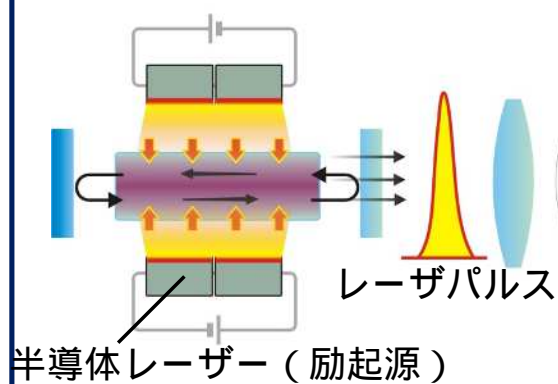


中性子応用

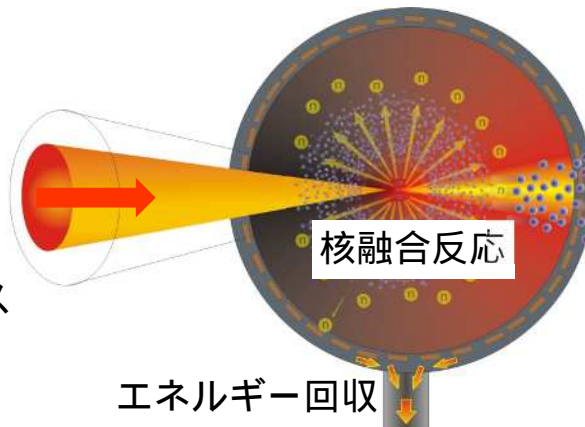


基盤技術

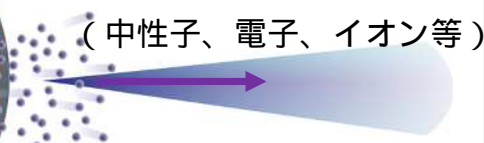
大出力レーザー技術



核融合（プラズマ制御）技術



量子ビーム技術



産業用レーザーを取り巻く近年の状況

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

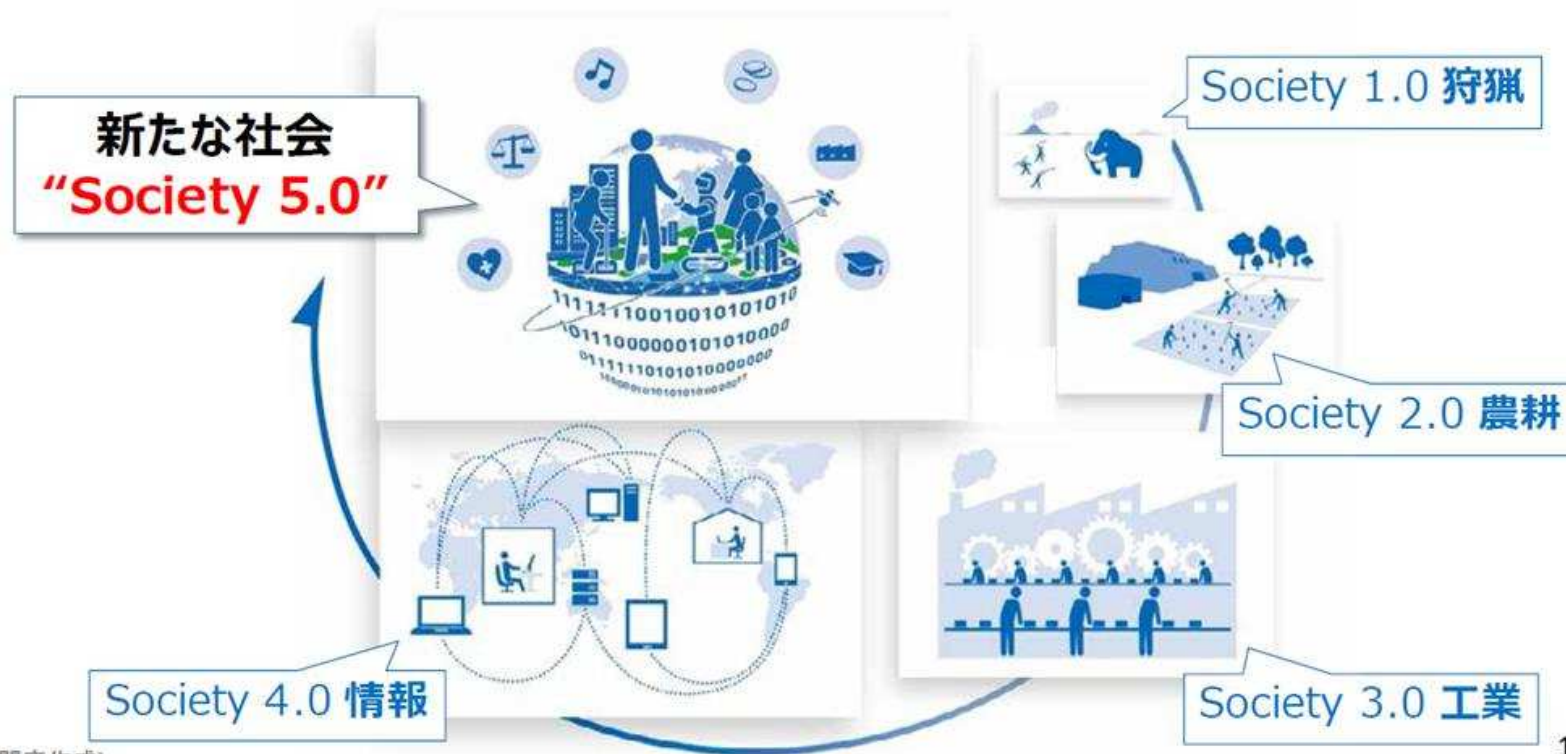


2030年までに達成すべき17の国際目標

大企業の多くがSDGsを活動の指針とし始めている

Society 5.0の実現に向けた取り組みが加速

サイバー空間とフィジカル（現実）空間を高度に融合させたシステムにより、
経済発展と社会的課題の解決を両立する、
人間中心の**社会（Society）**



内閣府作成]

https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html

1

サイバー空間とフィジカル空間の融合

フィジカル（現実）空間から**センサー**と**IoT**を通じてあらゆる情報が集積（**ビッグデータ**）
人工知能（AI）がビッグデータを解析し、高付加価値を**現実空間にフィードバック**

これまでの情報社会(4.0)

Society 5.0

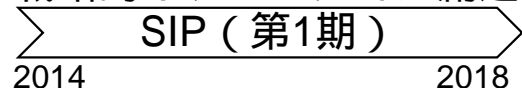


[内閣府作成]

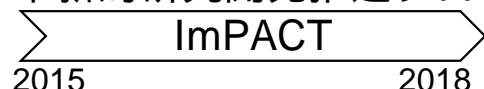
https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html

レーザー開発に関連する国家プロジェクトの動向

戦略的イノベーション創造プログラム



革新的研究開発推進プログラム



「ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現」

「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」



切れ目なく
国家プロジェクト
が走っている

「先端レーザーイノベーション拠点」



「光・量子を活用したSociety 5.0実現化技術」



Society 5.0

Society 5.0を実現するために
光・量子技術を活用することが
不可欠となっていることが背景

社会実装

レーザーの実用化技術開発が鍵となる

NEDO「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」プロジェクトの概要

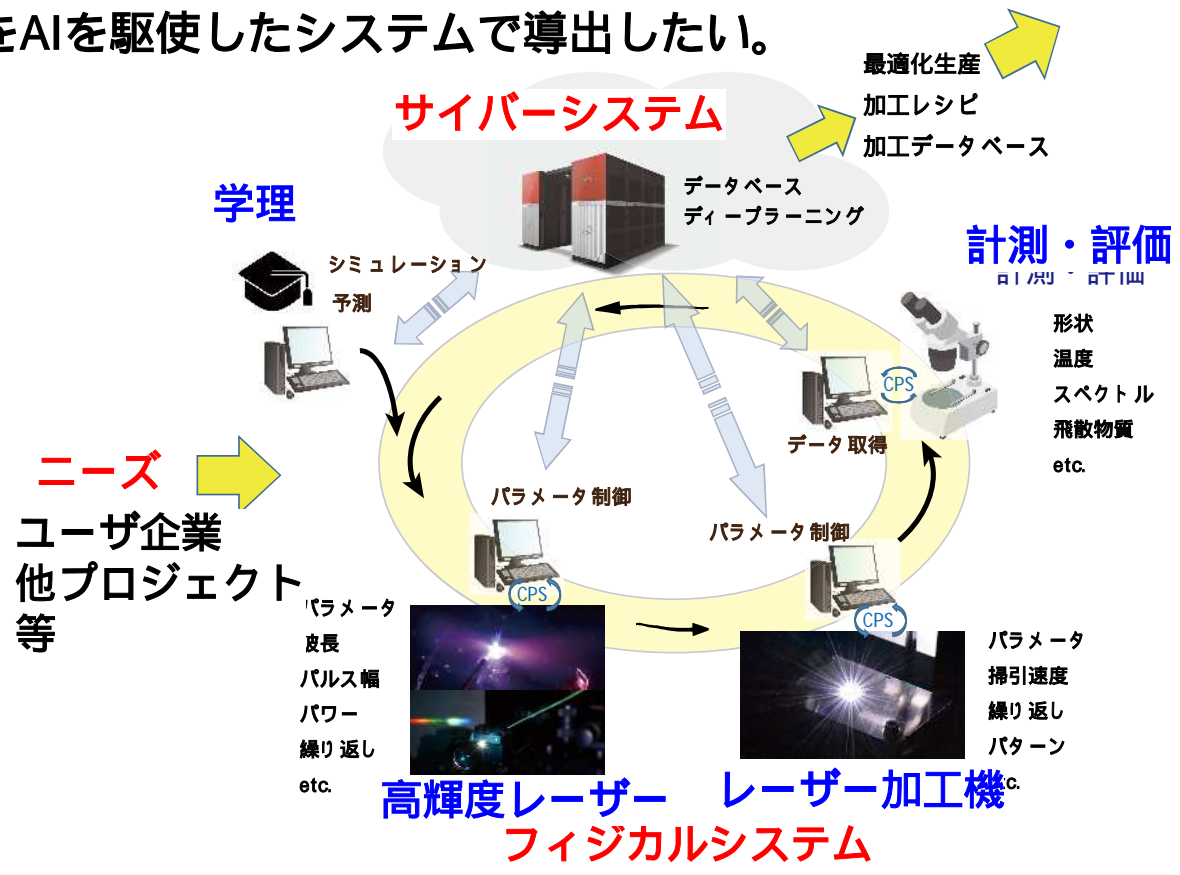
(東大・小林プロジェクトリーダー資料より抜粋)

経験と勘から最適化へ

**IoTによる知的(AI)生産システム
(高品位少量多品種生産システム)**

加工のパラメータはこれまで経験と勘から導き出されてきた。これをAIを駆使したシステムで導出したい。

超スマート社会へ



半導体レーザー(LD)励起セラミックスレーザーの開発

世界における近年のLD励起高エネルギーレーザーの状況

HiLASE(RAL)

100J × 10Hz

Advanced DPSSL laser, „DiPOLE 100“, delivers 1kW performance

„DiPOLE 100“ (alias „Rivoj“), a fully diode pumped solid state laser (DPSSL) designed and constructed at STFC's Central Laser Facility (CLF) at Rutherford Appleton Laboratory, was delivered under contract to the HiLASE Centre in the Czech Republic. In mid-December 2016, it achieved its full design performance, operating at an output energy of 100 J per pulse at 10 Hz [1 kW] for over 1 hour without operator intervention.



John Collier, Director of the CLF, said „This result is a vital milestone that moves the performance of high peak power lasers beyond the limits of conventional flash lamp pumping, opening up important new applications in materials processing, advanced imaging and fundamental science.“

Tomas Macek, Head of the HiLASE Centre, said „This is the first time that a high energy DPSSL system has broken the 1kW barrier. This performance is truly world leading and fully justifies our confidence in choosing DPSSL technology as the driver for applications-oriented RTD. My HiLASE and CLF colleagues and I are looking forward to further successes as the system moves into the operational phase.“

Optimisation of laser parameters will continue in January 2017 to build up operational experience and to fully characterise the system after which it will be brought on line for user experiments. Further details of the laser system performance will be announced at the joint Press Conference planned for January 2017 at the HiLASE Centre.

The 1 kW achievement follows the announcement last month of a 45 M€uro strategic collaboration between the Czech Institute of Physics, who operate HiLASE, and STFC, to create a new Centre of Excellence for the application and development of DPSSL systems.



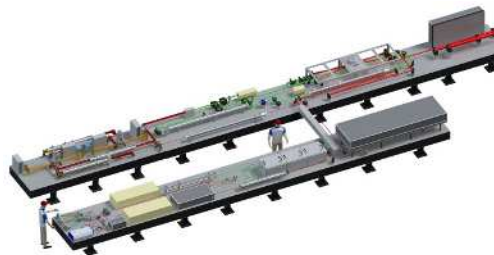
ELI-beamline(LLNL)

80J × 3.3Hz



The High Repetition-Rate Advanced Petawatt Laser System, or HAPLS, is being designed, developed, assembled and tested at Lawrence Livermore. It will be transferred to the ELI Beamlines facility in 2016, where it will be commissioned for use by the international scientific community. (Download image)

Lawrence Livermore announces significant step in the construction of a next-generation ultra-high power laser system



浜松ホトニクス

50J × 0.5Hz

The 6th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'17), Yokohama, Japan, Apr. 18 - Apr. 21, 2017

Demonstration of a 64J at 10ns Output from Cryo-cooled Yb:YAG Laser using new laser-diode technology

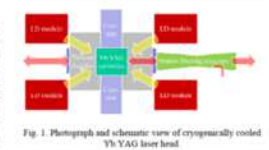
T. Sekine¹, Y. Takeuchi¹, Y. Hirono¹, Y. Maruyama¹, T. Kurata¹, T. Morita¹, Y. Minami¹, Y. Kabeya¹, K. Kawai¹, T. Iguchi¹, Y. Yamada¹, M. Korata¹, K. Iiyama¹, Y. Zhang¹, Y. Kan¹
¹Industrial Development Center, Central Research Laboratory, Hamamatsu Photonics K.K., 1830 Karamoto, Nishi-ku, Hamamatsu, Shizuoka 431-1202 Japan, Tel: +81 53 487 5100, Fax: +81 53 487 3132, e-mail:eri.hpk.co.jp

Abstract: A high gain diode-pumped cryogenic Yb:YAG ceramics laser amplifier for a high energy laser amplification system has been developed. A 10 of small-signal-gain at single pass was obtained when an output energy of LD module was 430 J. Then stored energy density was evaluated to 0.6 J/cc when 14.2 J energy was stored in 140 cc of Yb:YAG ceramics. As a result, a 64J at 10 ns output was demonstrated by two pass amplification with an extraction efficiency of 43.1%.

1. Introduction
A laser is a necessary tool in a metal processing. In particular, a fiber laser and disk laser are used for cutting and welding process. A pulsed laser with ultra-narrow class are also practically used such as a Stealth Dicing for semiconductor process. High energy pulsed lasers are applied for pump source of Ti:sapphire laser and OPCPA amplifier in scientific fields. Recently new industrial application with high energy laser of over Joule class is expected of laser peening or laser forming. Some new projects of development of 100J class lasers are started in Europe and the United States [1, 2]. We have started development of 100J class laser system [3]. In this report, we presented current achievement of output energy of 64J with pulse duration of 10ns.

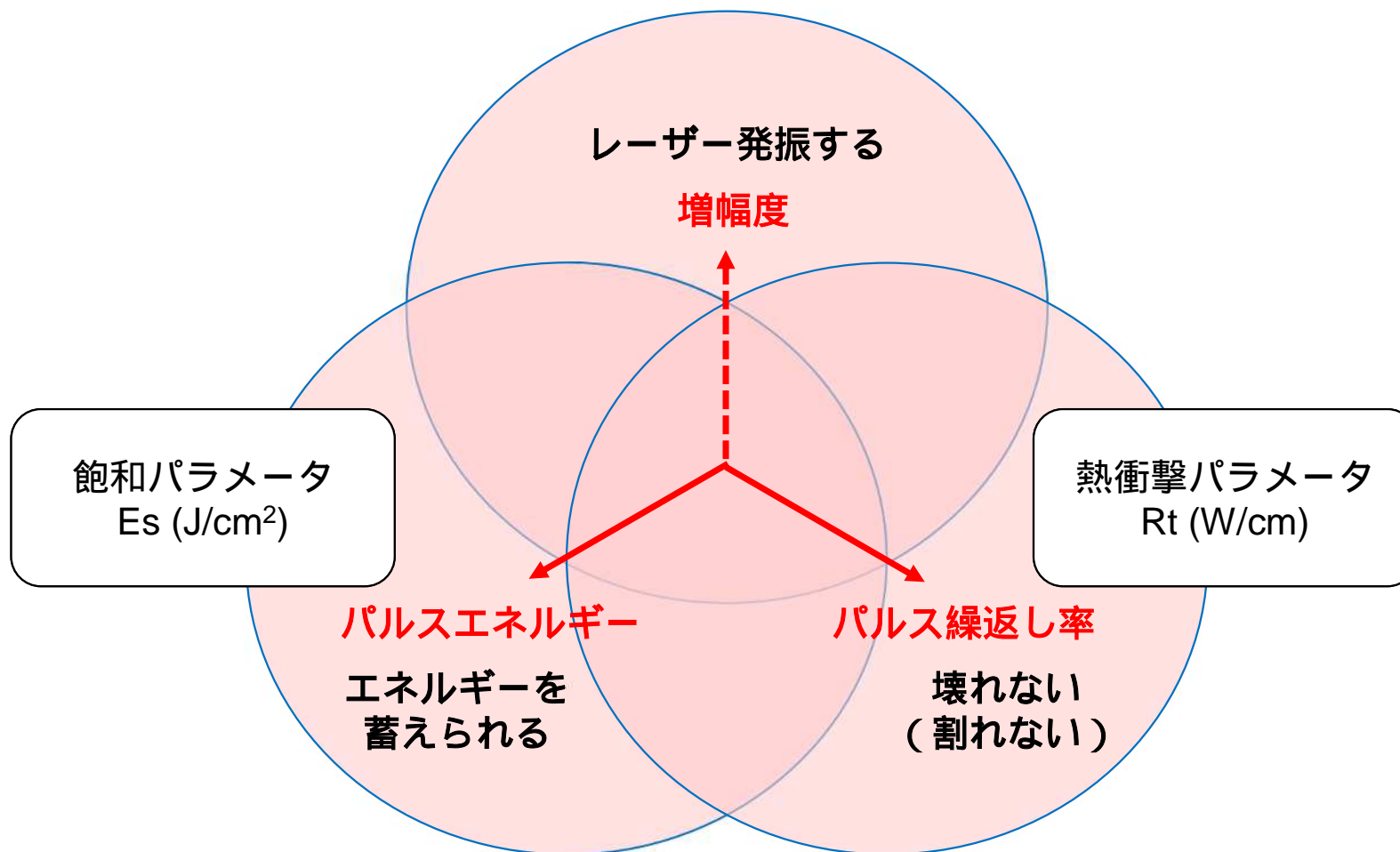
2. Yb:YAG laser amplifier
A photograph and schematic view of a laser head for 100J class laser amplification is shown in Fig. 1 (a). A size of the laser head is 5m in width, 2.5m in depth and 2.2m in height, approximately. This laser head consists of four LD modules (Fig. 2 (a)), a Yb:YAG ceramics, two cryostats and spatial-filtering telescope. The Yb:YAG ceramics is temperature controlled by two cryostats and two heaters from upper and bottom side. The Yb:YAG ceramics are set into a vacuum chamber to thermally insulate from atmosphere. The spatial-filtering telescope is used as an injector of a seed pulse from picosecond area for angular multipass amplification scheme. The LD module was designed to irradiate uniformly by superposing output patterns of 20 number of a LD stacks on the Yb:YAG ceramics. Each LD stack irradiated on the Yb:YAG ceramics after forming its beam pattern during a propagation at the LD module with transmission efficiency of over 90%. The laser head pumped by four LD modules, which irradiated the Yb:YAG ceramics directly from upper and lower sides as shown in Fig. 1(a). This angular pumping scheme ideally increases irradiation intensity and homogenizes irradiation pattern on the Yb:YAG ceramics due to superposition effect of all of the LD modules. A seed pulse propagates 2 times in the middle of the upper and lower LD modules with slightly different propagating angles. A size of Yb:YAG

ceramic is 10cm square without Cr³⁺:YAG. Original cladding technique contributed to suppression of parasitic oscillation inside of the Yb:YAG ceramics.

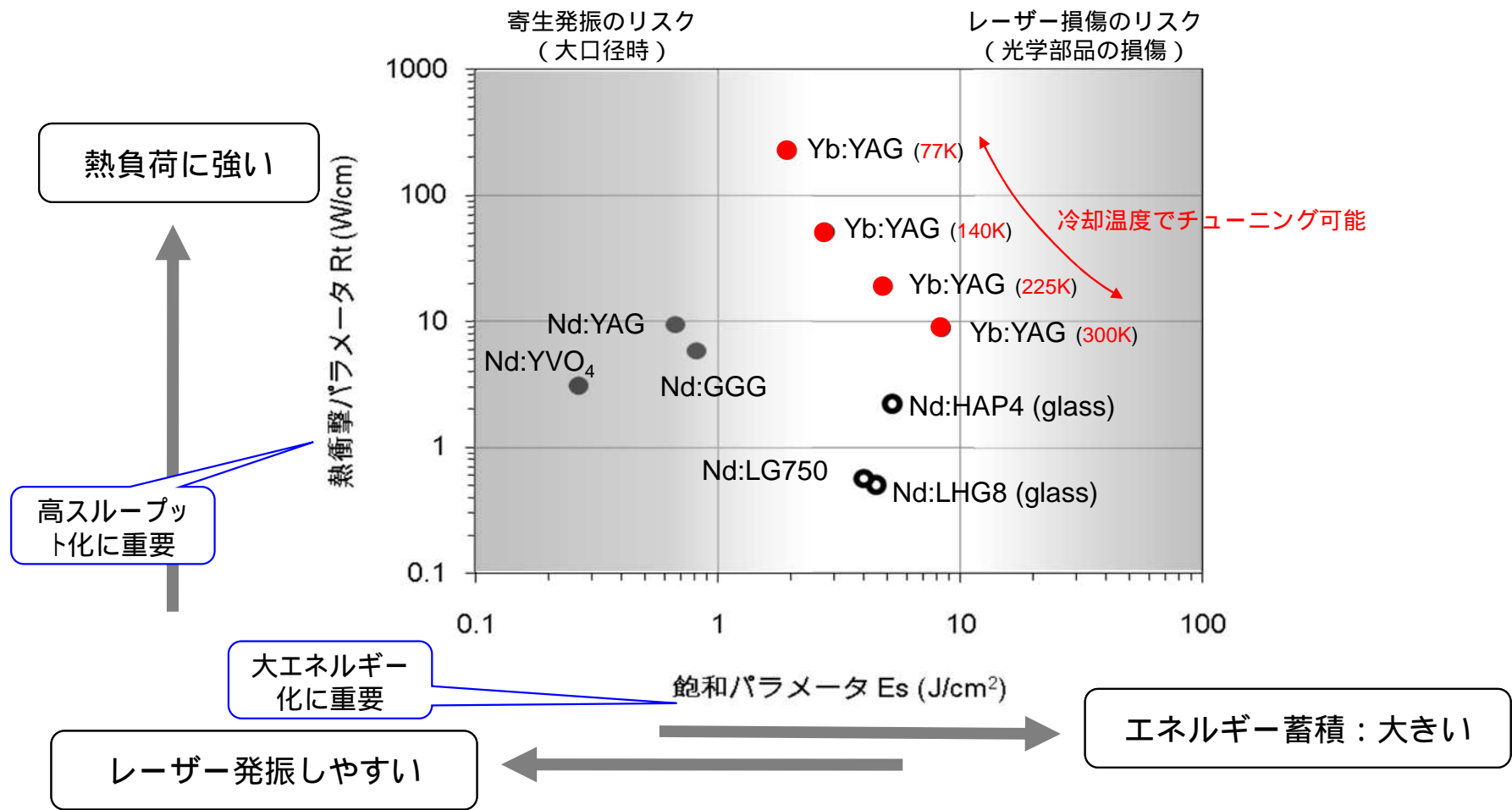


3. Pump LD module
A photograph and specifications of the LD modules are shown in Fig. 2 and Table 1. The one LD module which consisted of 20 LD stacks is designed to irradiate uniformly by superposing each output pattern of all the LD stacks on the Yb:YAG ceramics by using one of the cylindrical condenser lens after the LD module. In fact, over 6 kW of peak-power from each LD stack irradiated on the Yb:YAG ceramics after forming its beam pattern during a propagation inside of the LD module with transmission efficiency of over 90%. As a result, a maximum peak power of 110 kW was generated from the one LD module. Then irradiating intensity on the Yb:YAG ceramics is 2.6 kW/cm².

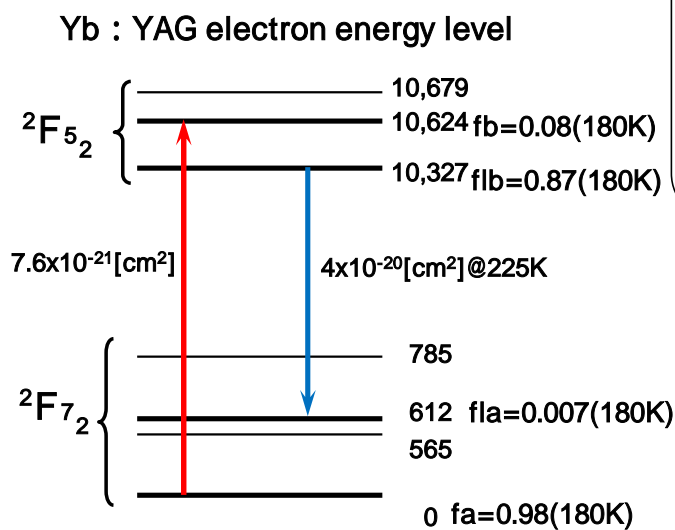
大出力レーザー材料に必要な3つの特性



飽和パラメータと熱衝撃パラメータ



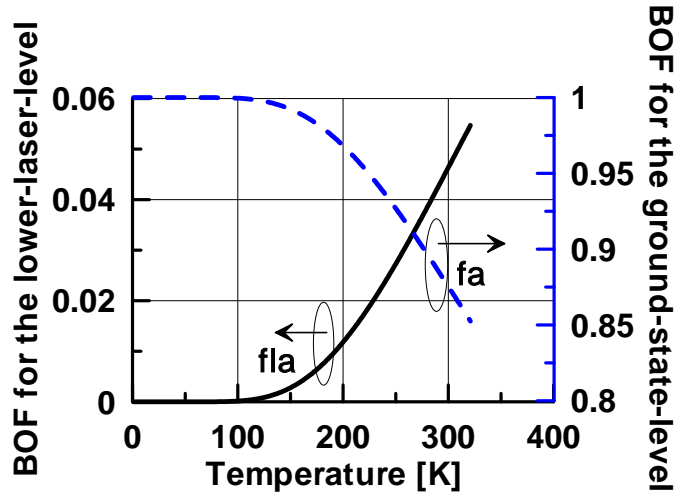
Yb:YAGの低温動作時のメリット



Boltzmann Occupation Factor

$$f_i = \frac{\exp\left(-\frac{h\Delta\nu_i}{k_B T}\right)}{\sum_j \exp\left(-\frac{h\Delta\nu_j}{k_B T}\right)} \quad \Delta\nu_n = \nu_n - \nu_0$$

The minimum frequency in a manifold



150K以下ではYb:YAGは4準位系レーザーとして振る舞う

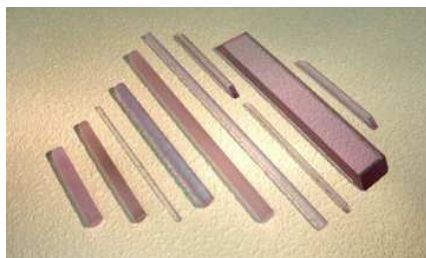
レーザーセラミックスの特長

レーザーガラス

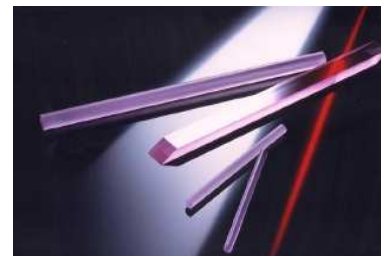


Nd:glass slab (40cm x 10cm x 1.5cm)

単結晶



透光性セラミックス



10cm square
YAG ceramics

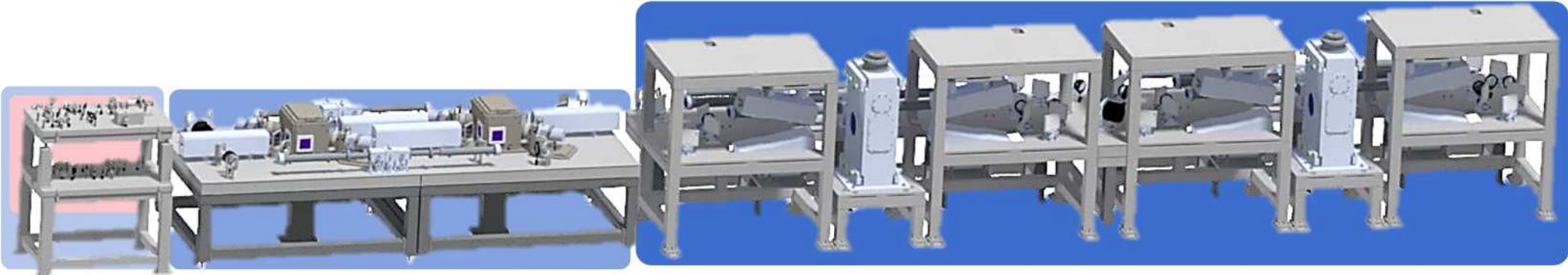
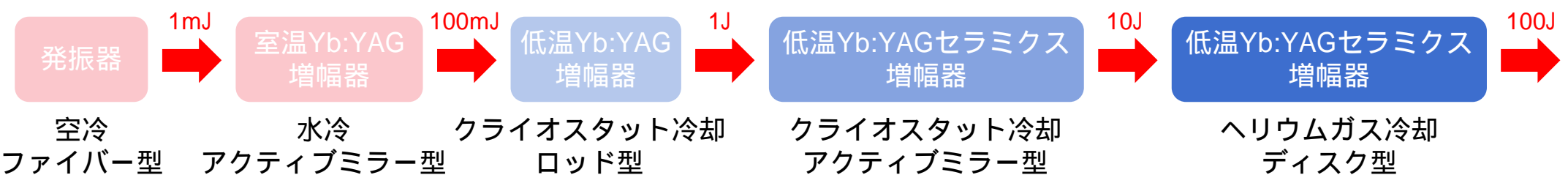
	レーザー ガラス	単結晶	透光性 セラミックス
低コスト	×	×	○
大型化	○	×	○

LD励起Yb:YAGセラミクスレーザー装置の概要

	Nd:YAG	Nd:ガラス	Yb:YAG
励起波長	808nm	888nm	940nm
ストークス効率	76%	~ 84%	~ 91%
蛍光寿命	230 μ s	360 μ s	1ms
LDコスト比率	5.2	3	1
熱伝導率	>10W/m \cdot K	~ 1W/m \cdot K	>10W/m \cdot K

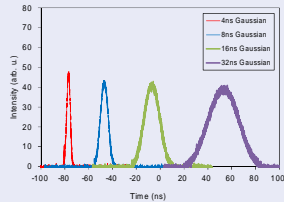
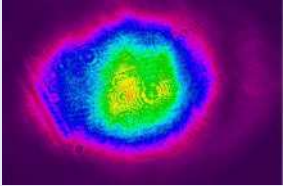
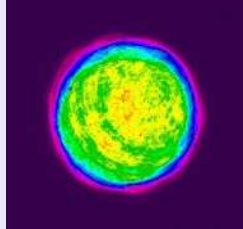
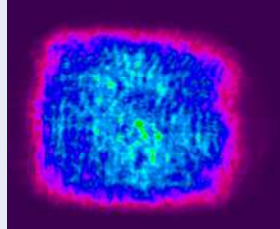
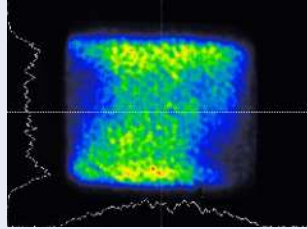


- 誘導放出断面積の制御
 - ✓ 増幅特性を最適化
- 熱伝導率が増加
 - ✓ 熱レンズ効果の抑制
 - ✓ 熱ショックパラメータの向上

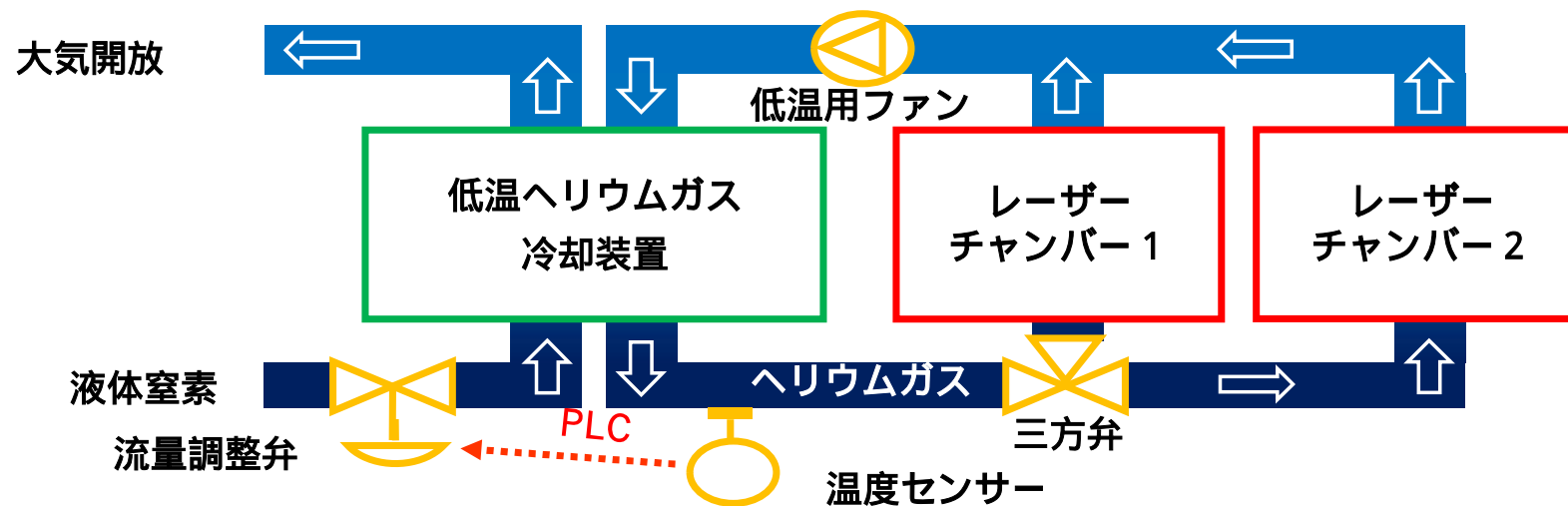


各増幅器における特性



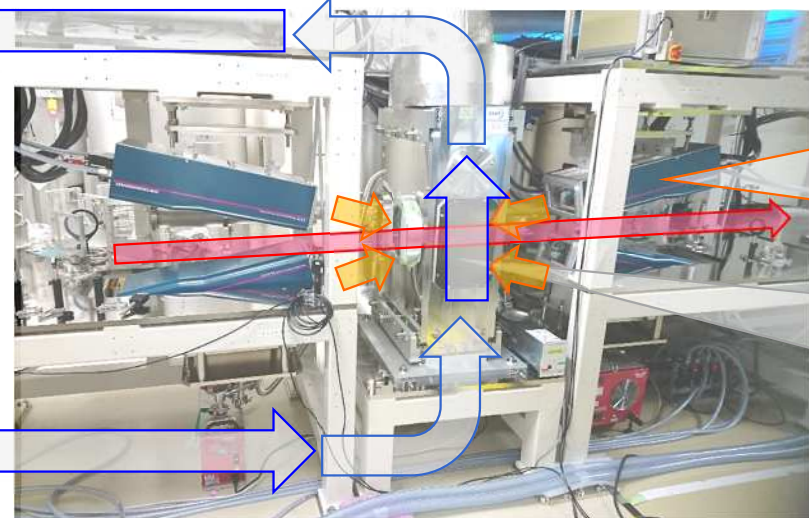
	発振器	100mJ増幅器	1J増幅器	10J増幅器	100J増幅器
動作温度	室温	室温	低温	低温	低温
エネルギー	1 μ J	117 mJ	0.8 J	11J	117J
繰り返し率	10 Hz	10 Hz	10 Hz	0.05Hz	0.05Hz
諸特性	任意波形成形 	NFP 	NFP 	NFP 	NFP 

低温ヘリウムガス冷却マルチディスクYb:YAGセラミックス増幅器



低温ヘリウムガス冷却装置

ガス温度：100K
 ガス圧力：0.9MPa
 冷却能力：7kW



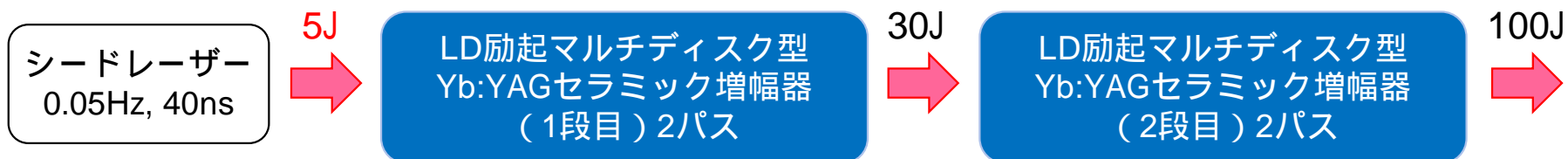
LDモジュール

100J × 10Hz
 (平均出力1kW)

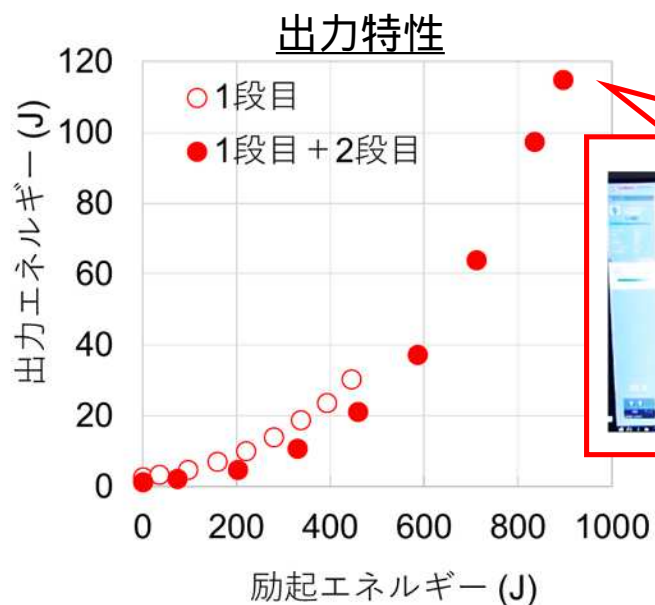
Yb:YAGセラミックス

直径：120mm
 厚さ：10mm
 枚数：6枚

レーザー出力特性



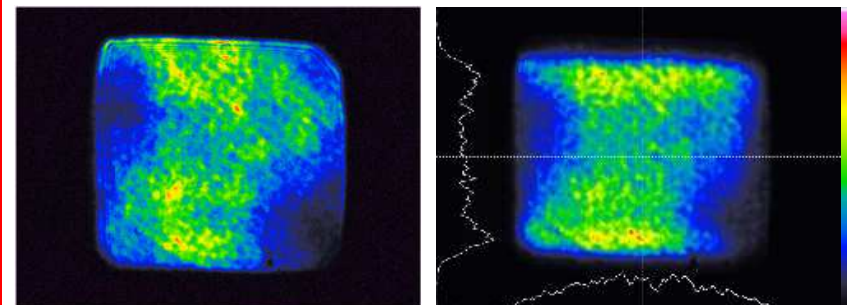
LD励起の繰り返し率: 0.5Hz



近視野像

非励起

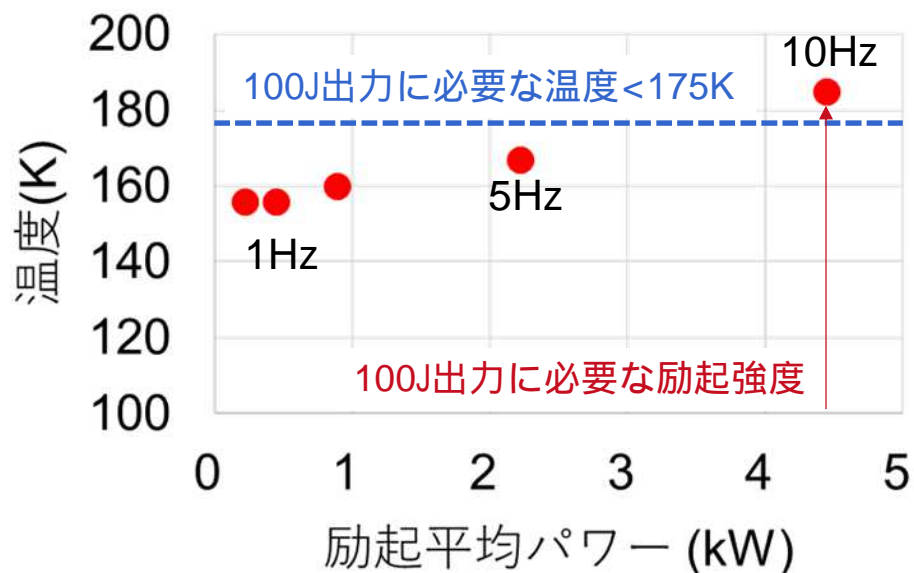
117J出力



- 100J × 10Hz動作に向けた開発を行っている。
- 1.5年後までに250J級レーザー出力を実証する。

高繰り返し動作時の冷却性能

Yb:YAGセラミックスの温度評価



冷却条件の比較

	本試験	ヘリウム循環器の定格
冷却温度	150K	< 150K
ヘリウムの圧力	4気圧	~ 8気圧
体積流量	1m ³ /分	2m ³ /分
質量流量	20g/秒	~ 80g/秒

➤ ヘリウム循環器の定格動作により、10Hz動作が可能であることを確認

励起用LDの高出力化

1993
QCW 100W
diode bar



2001
5kW (1J) stack



2002
120 kW module



100kW (100J) module 2014



Mass production



2004
200 kW module

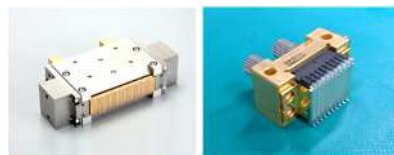
2013
6kW (6J) stack



高出力LDモジュールの開発

新型LDスタック

アクティブ冷却 パッシブ冷却*



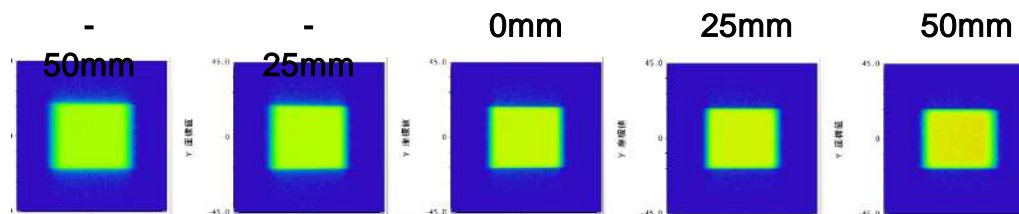
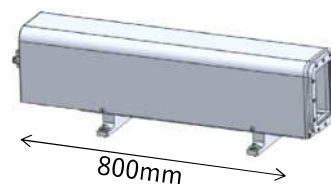
繰り返し率	>10Hz	10Hz
波長	940nm	940nm
ピークパワー	6kW	7.5kW
パルス幅	1ms	1ms
エネルギー	6J	7.5J
速軸発散角	<0.3deg.	<0.3deg.
サイズ	150cm ³	6.7cm ³
コスト	1	1/3

* N. Kageyama et. al., IEEE Photonics Technology Letters, **28**, 9, 983 – 985 (2016)

小型LDモジュールの開発

【目標仕様】

	従来型	新型
ピーク出力	40kW	>100kW
パルス幅	1ms	1ms
照射強度	>2.5kW/cm ²	>2.5kW/cm ²
均一性	>90%	>90%
エネルギー	40J	>100J



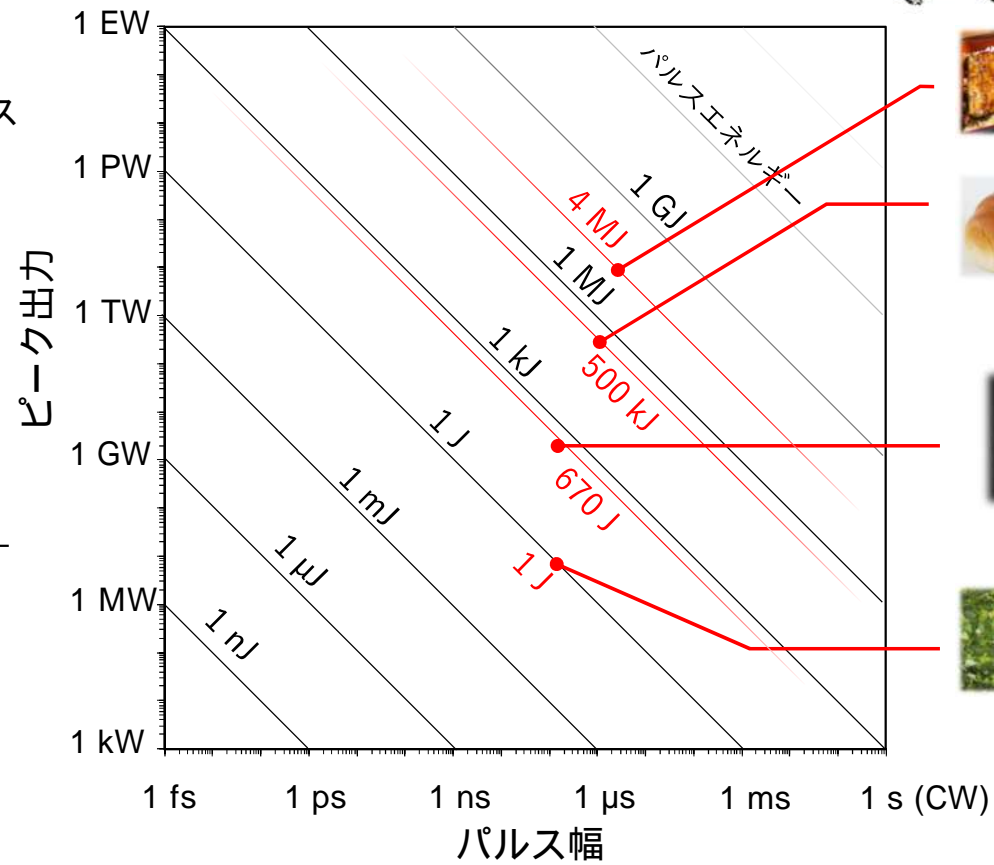
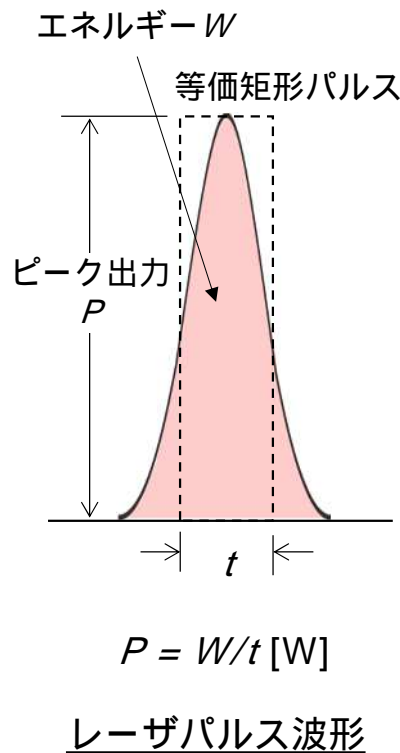
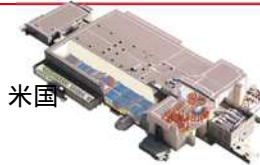
世界最高出力の小型LDスタックを搭載した高出力LDモジュールを開発

大エネルギーレーザーパルスの産業応用

パルス幅とエネルギー・ピーク出力の関係

NIF (国立点火施設)

ローレンスリバモア国立研究所、米国
4 MJ@1053nm, 192 beams



960 kcal



120 kcal



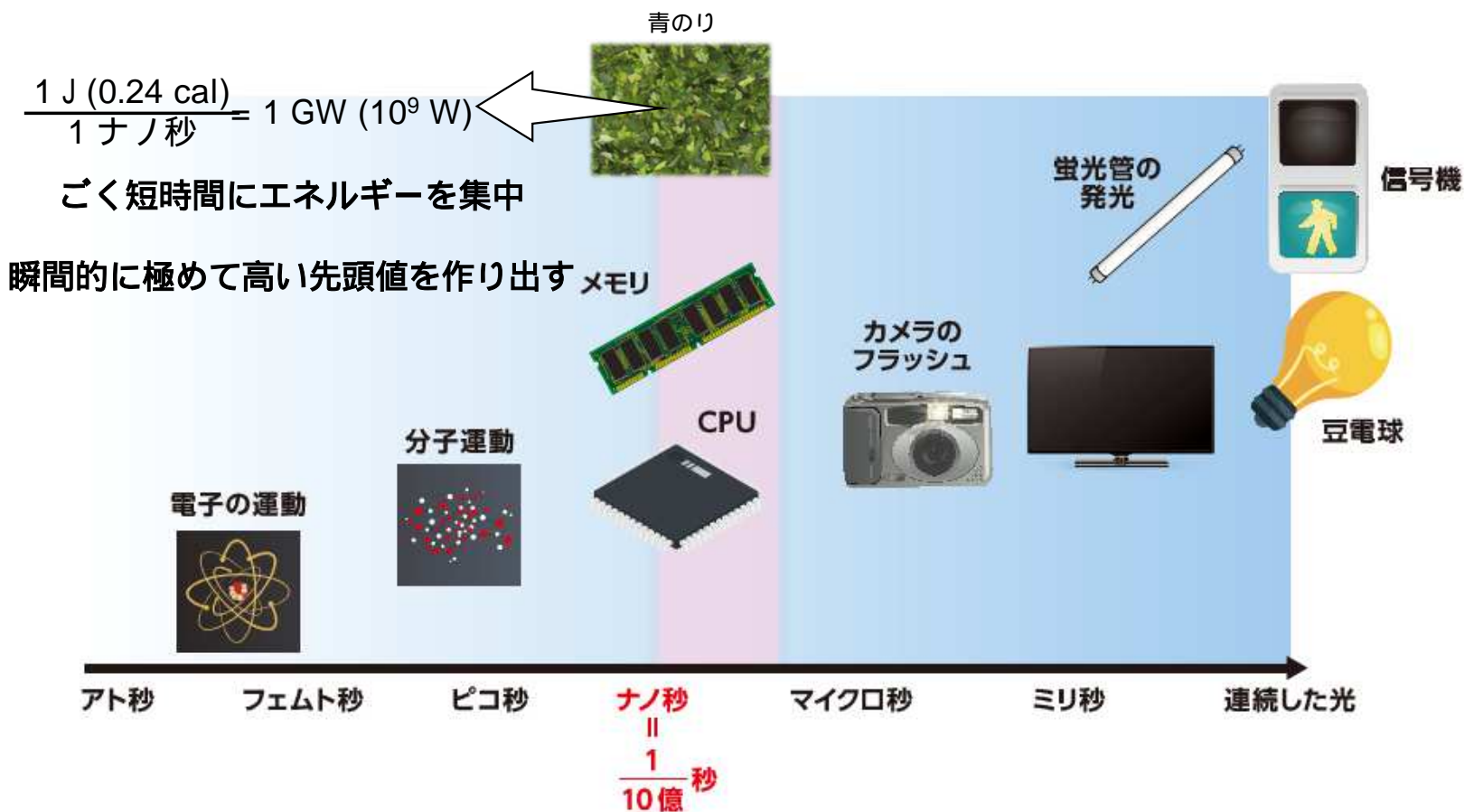
0.16 kcal



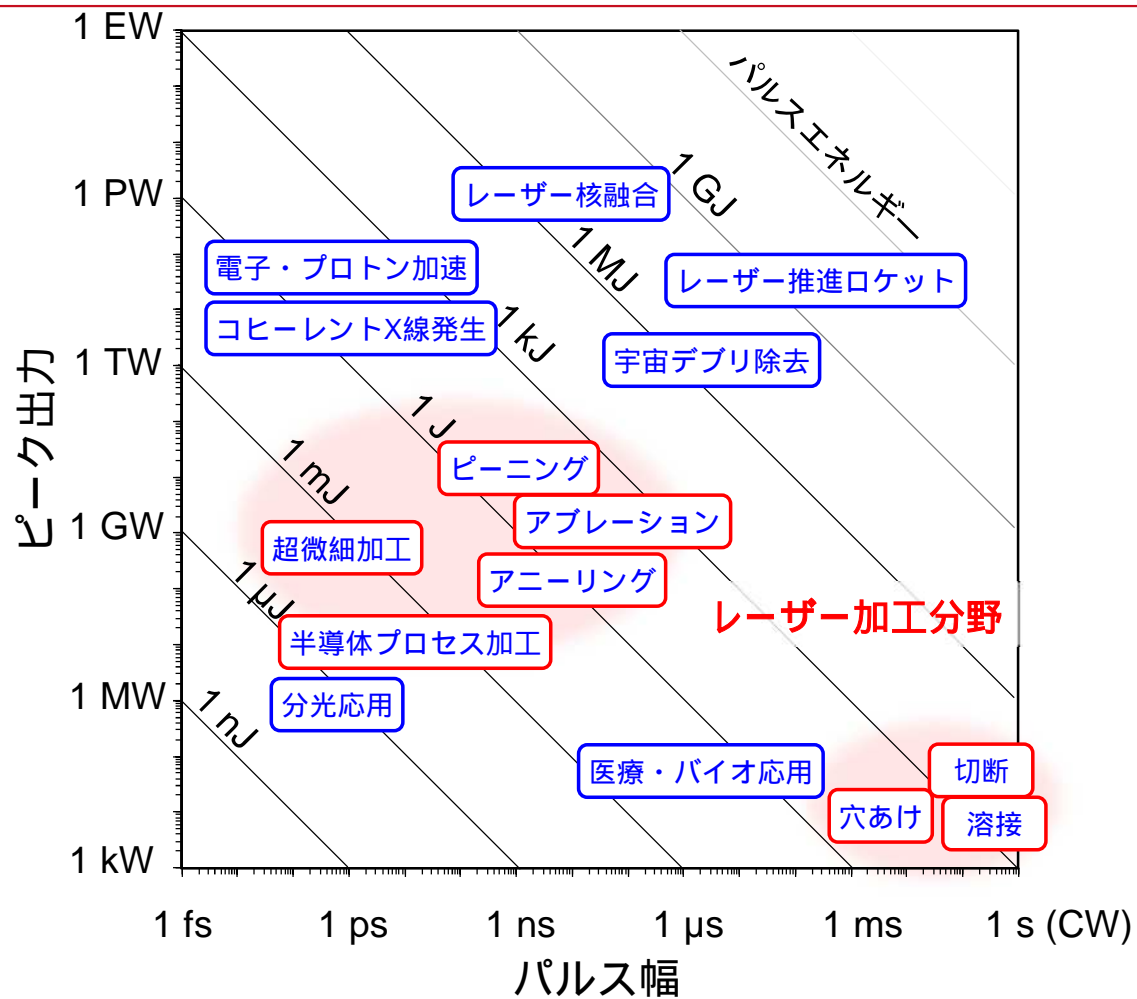
0.24 cal

||
青のり
ひとかけら

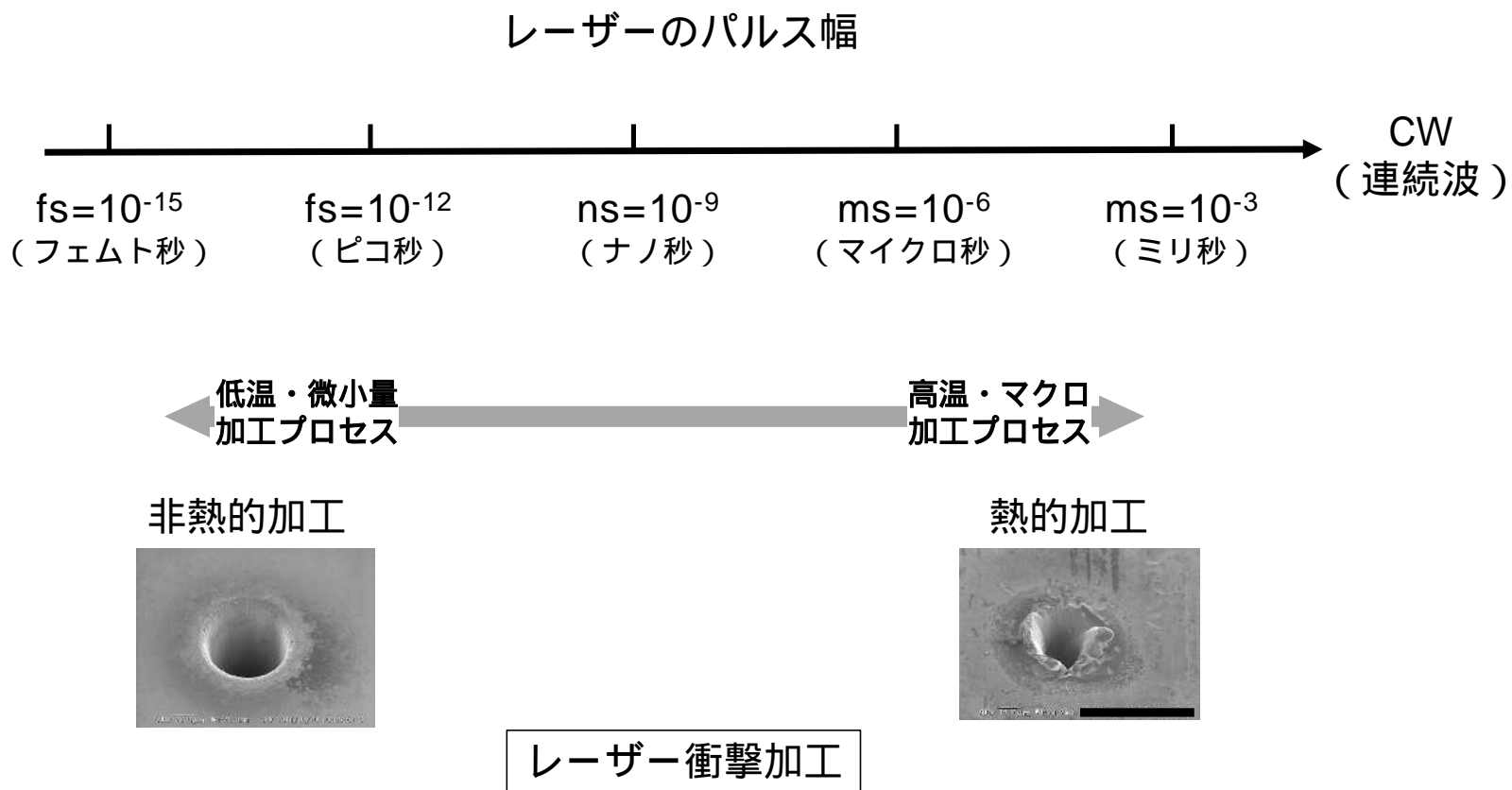
わずかなエネルギーを瞬間的に閉じ込める



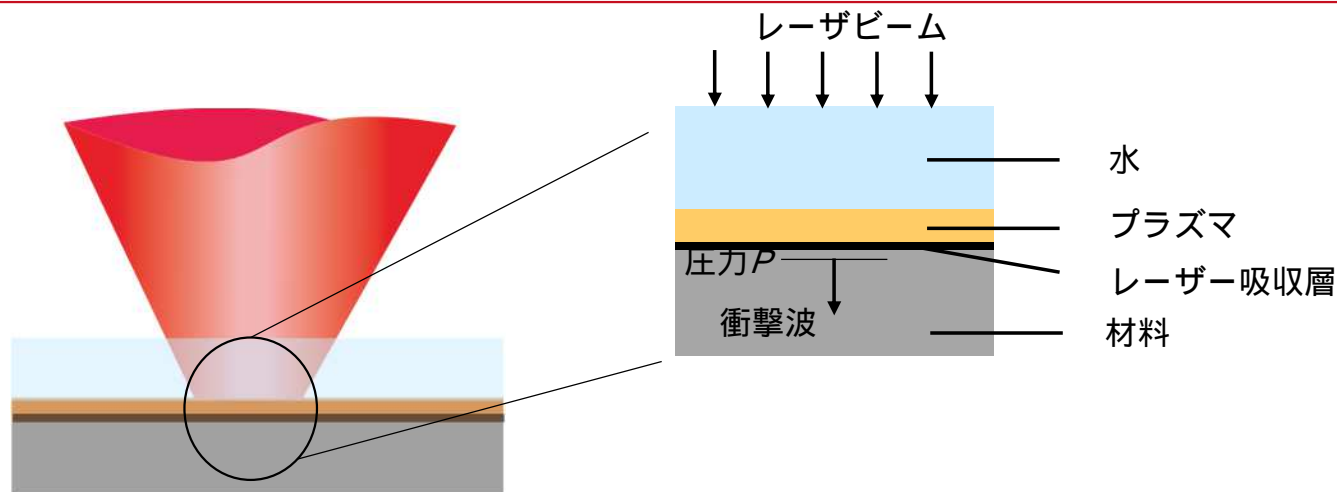
高出力レーザーの応用



パルス幅と熱影響



レーザー衝撃加工



$$\text{レーザー誘起圧力 } P(\text{GPa}) = 0.01 \left(\frac{\alpha}{2\alpha + 3} \right)^{1/2} Z^{1/2} \times I^{1/2}$$

$$= 1.0 \times I^{1/2} \text{ (水を用いた場合)}$$

α : レーザプラズマ相互作用の効率
 Z : ショックインピーダンス ($\text{g}/\text{cm}^2\text{s}$)
 I : レーザー強度 (GW/cm^2)

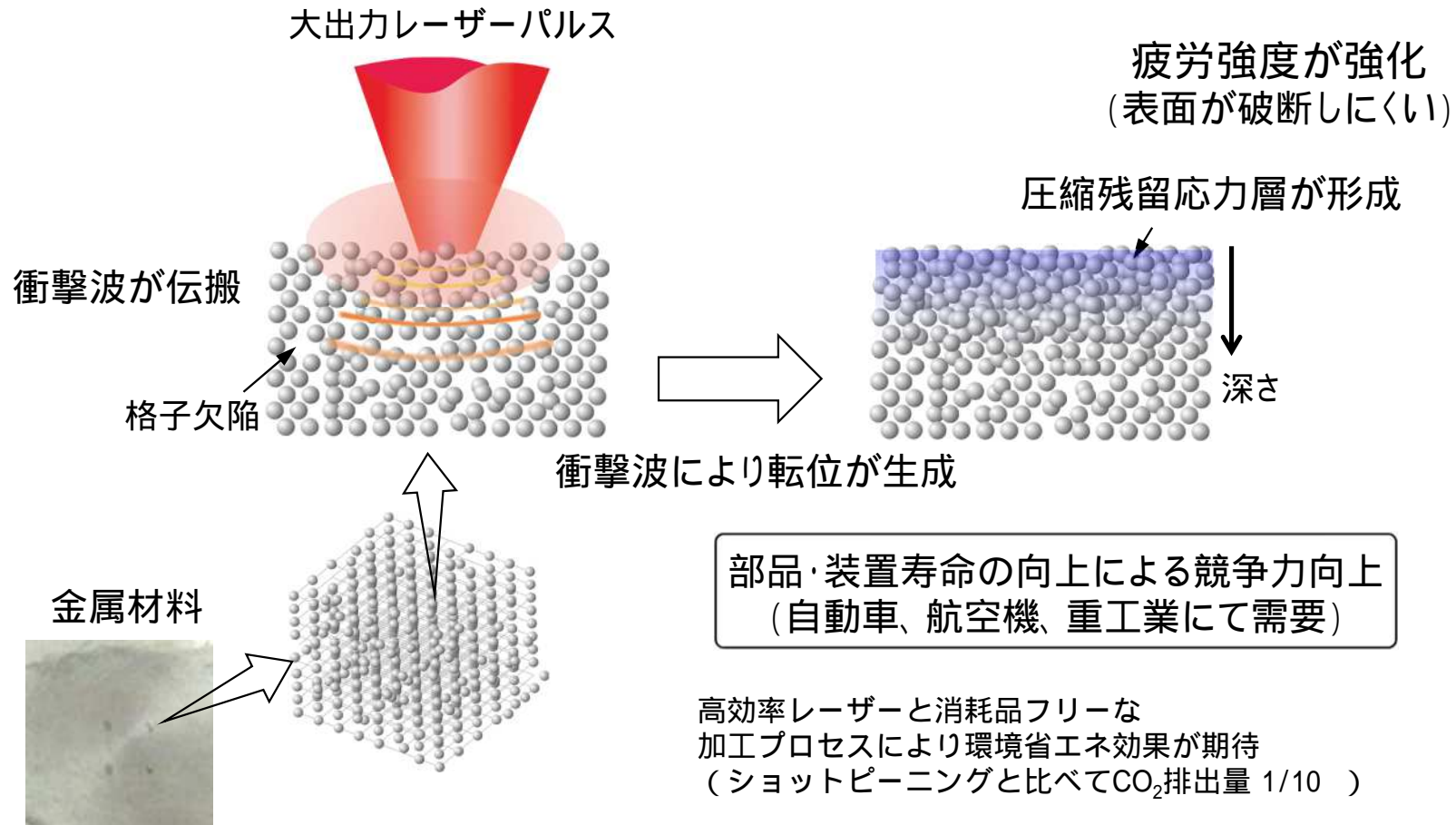
【一例】

レーザーエネルギー 1 J
 パルス幅 10 ns
 集光スポット直径 30 μm

レーザー強度 $I = 14.1 \text{ TW}/\text{cm}^2$
 圧力 $P = 119 \text{ GPa}$ (117万気圧)

*P. Peyre and R. Fabbro, Opt. Quantum Electron. **27**, 1212-1229 (1995).

レーザー衝撃加工による金属の強化



*F. Zhao et al., J. Cleaner Prod. 18, 1311-1319 (2010).

残留応力の計測法

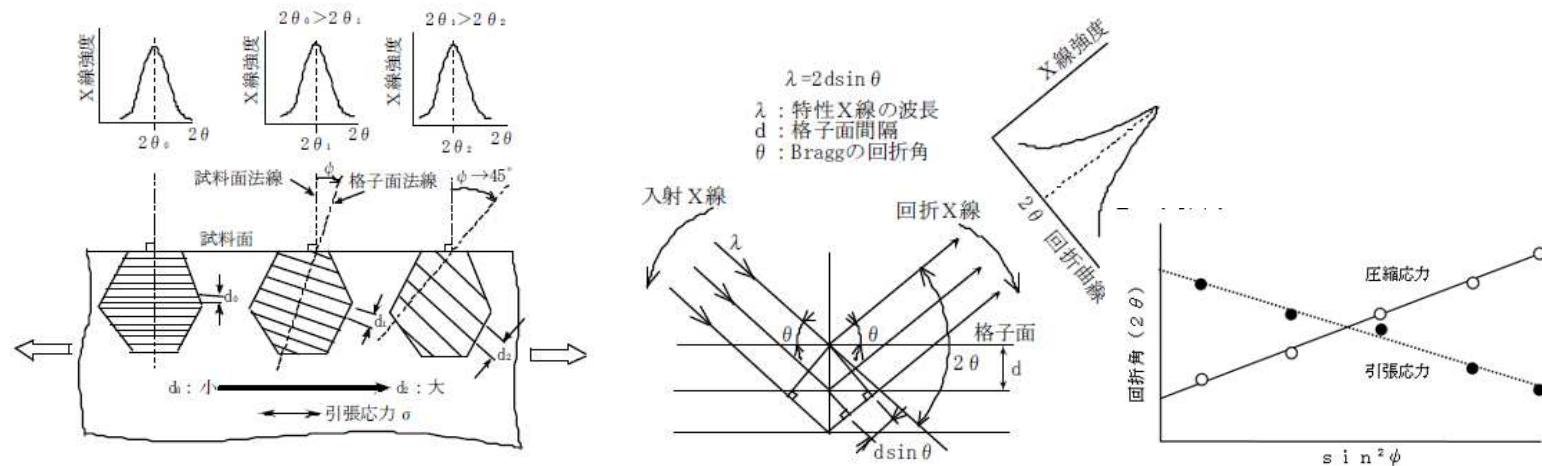
破壊検査

- 歪みゲージ法、穿孔法等
- 切断や穿孔などによって開放される歪みを計測

非破壊検査

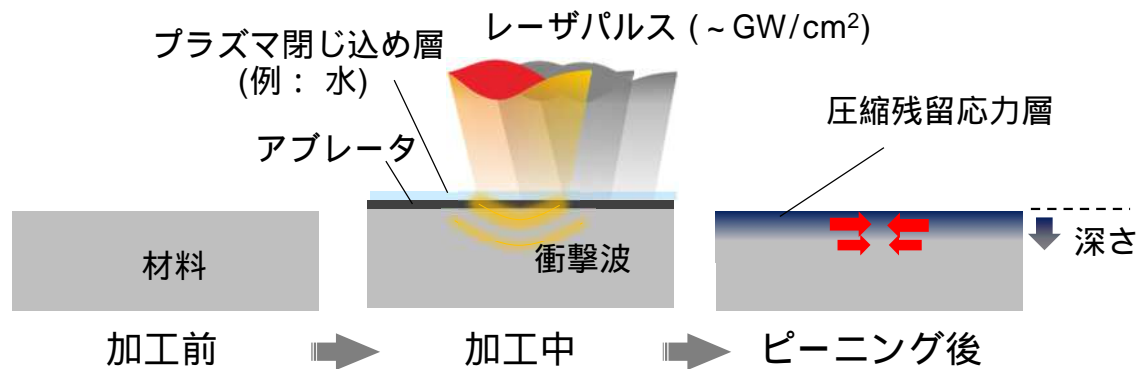
- **X線回折法**、放射光X線回折法、中性子回折法等
- 放射線のBragg回折を利用し、格子面間隔の変化量(歪み)から応力を測定

Bragg回折*

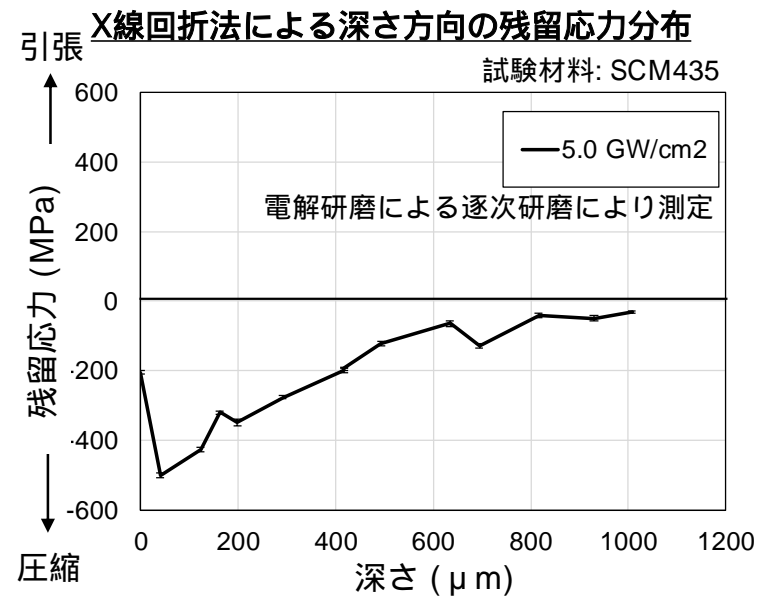
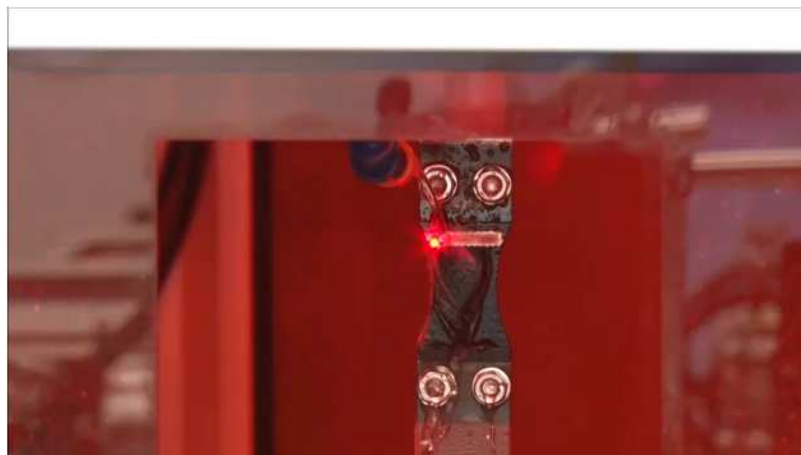


*村田一夫、産技研ニュース 77, (2001).
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/239462/www.tri.pref.osaka.jp/kankou/news/No77/Xray.pdf>

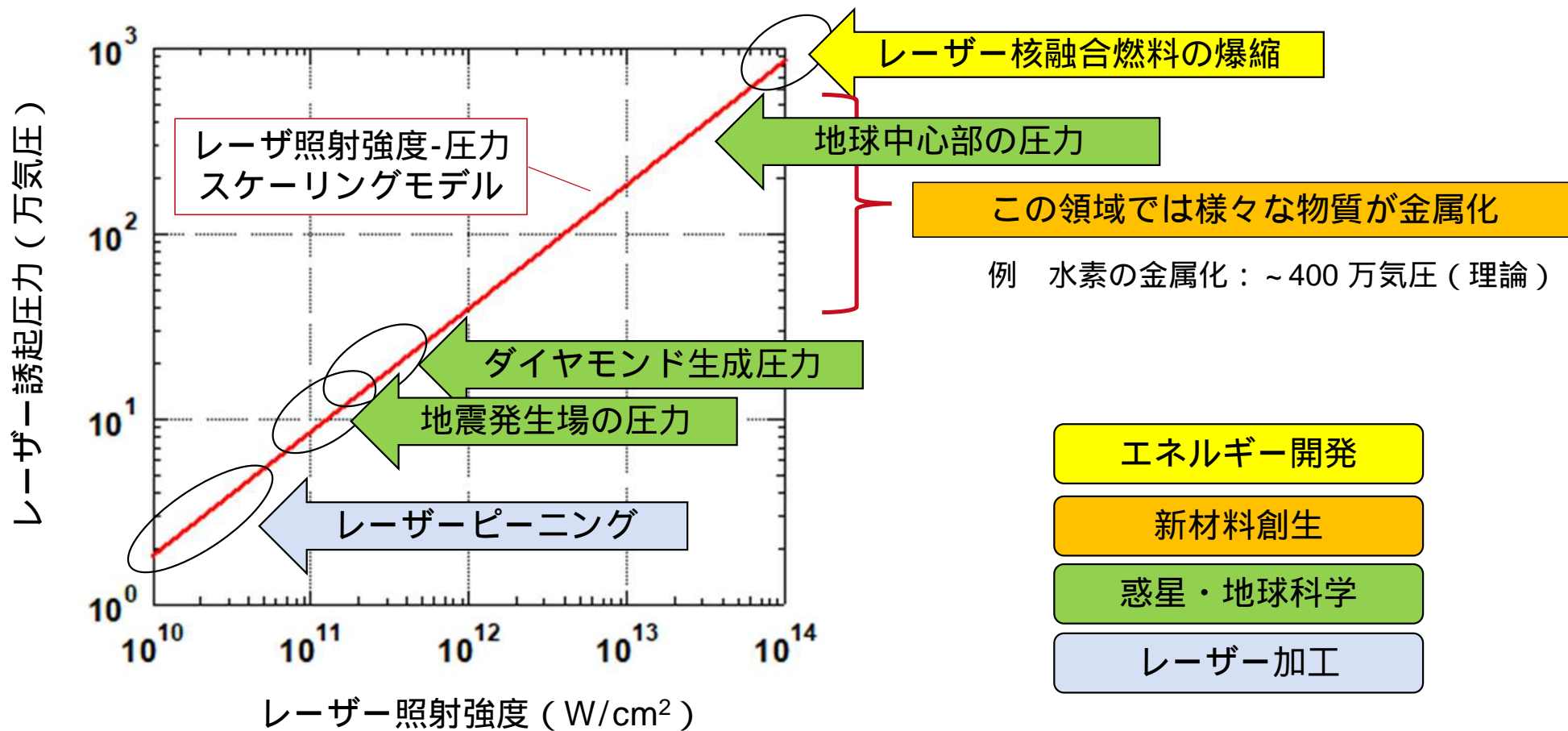
レーザー衝撃加工（レーザーピーニング）の実例



レーザーピーニング加工の模式図

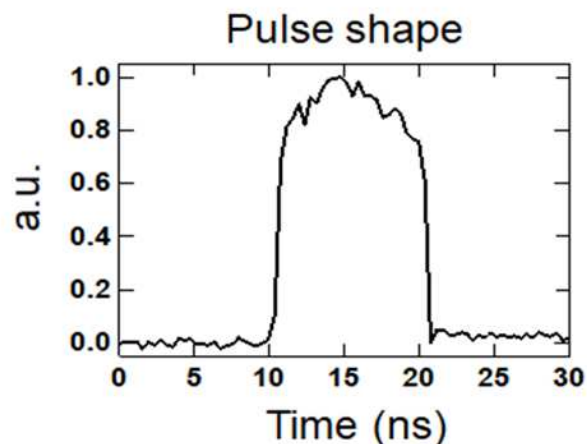


大出力レーザーによる超高压発生とその応用



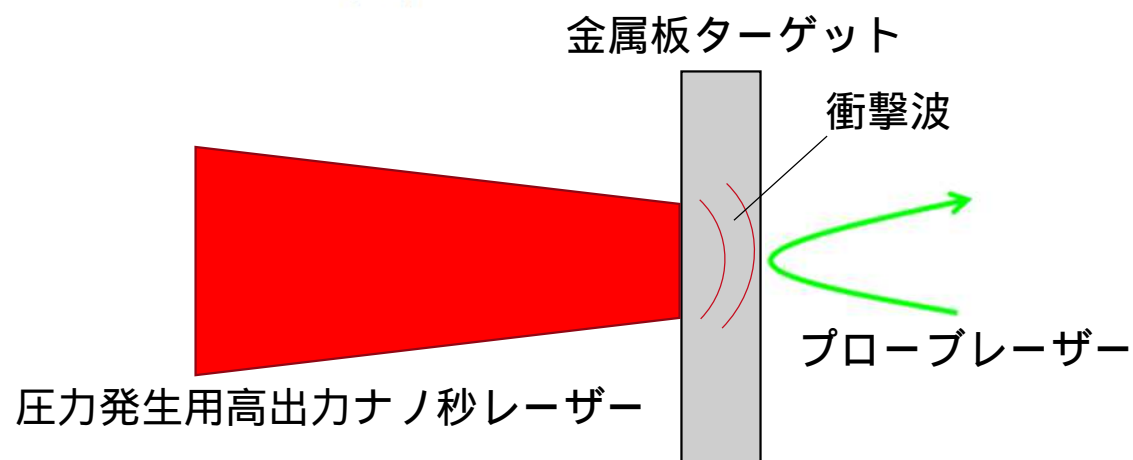
レーザーによる高圧発生とその測定手法

高い照射強度を広い面積で得るために**高出力ナノ秒レーザー**を使用



Energy : 5 ~ 40 J
 Wavelength : 1030 nm
 Pulse shape : 10 ns square
 Intensity : $1.6 \sim 7.7 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$

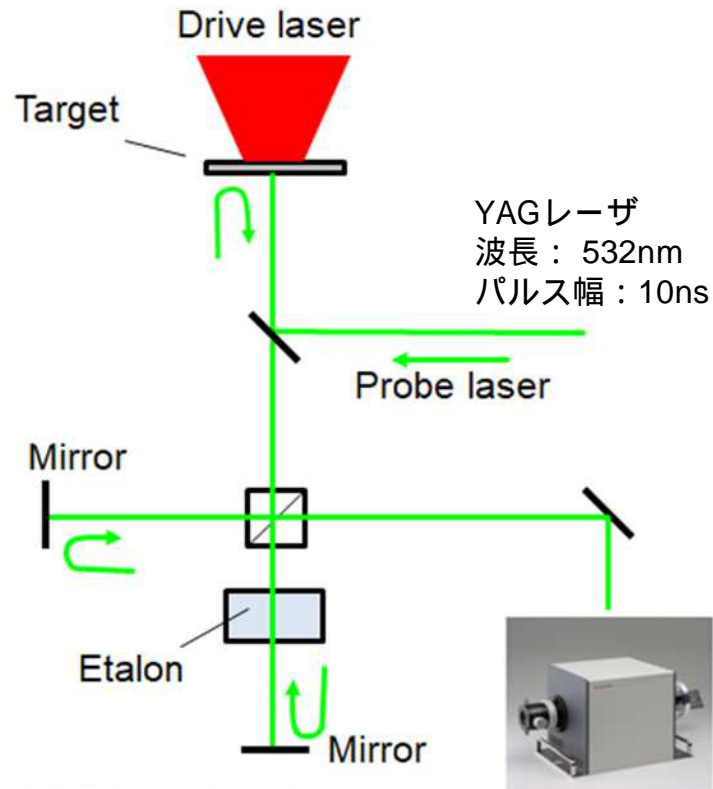
非常に高速な現象であるため
 圧力の直接測定は困難・・・



衝撃波による金属板ターゲット裏面の動きを
 速度干渉計で観測し圧力を評価

速度干渉計 (VISAR) によるレーザー誘起圧力の評価

速度干渉計 : VISAR (Velocity Interferometer System at Any Reflector) Ref J. Appl. Phys. 43, 4669, 1972



マイケルソン干渉系

Streak camera
C7700 (HAMAMATSU)

衝撃波によって動いたターゲットにより
プローブレザーが受けるドップラーシフト

$$\lambda = \frac{\sqrt{1-\beta}}{\sqrt{1+\beta}} \frac{\sqrt{1-\beta}}{\sqrt{1+\beta}} \lambda_0 = \frac{1-\beta}{1+\beta} \lambda_0 \approx \left(1 - \frac{2}{c}v\right) \lambda_0$$

$\beta = v/c$, v : ターゲット裏面の速度 (~km/sオーダー)

波長の変化量 $d\lambda$ は 10^{-12} m のオーダーで分光器での測定は不可能

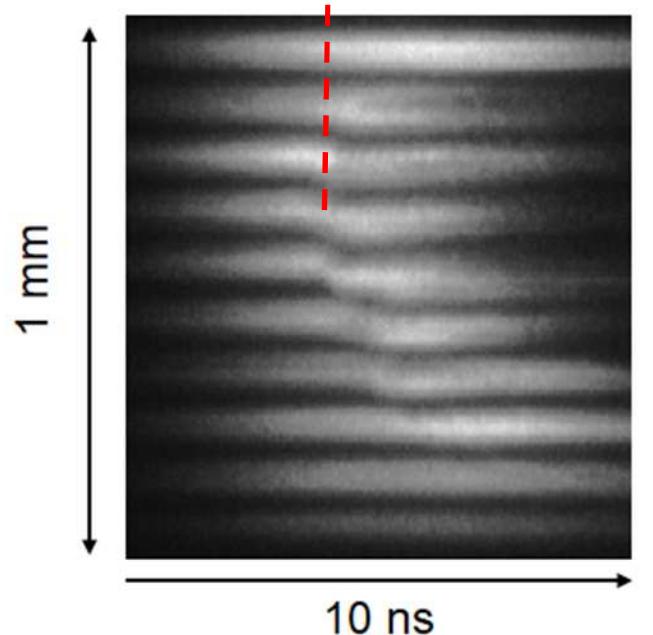
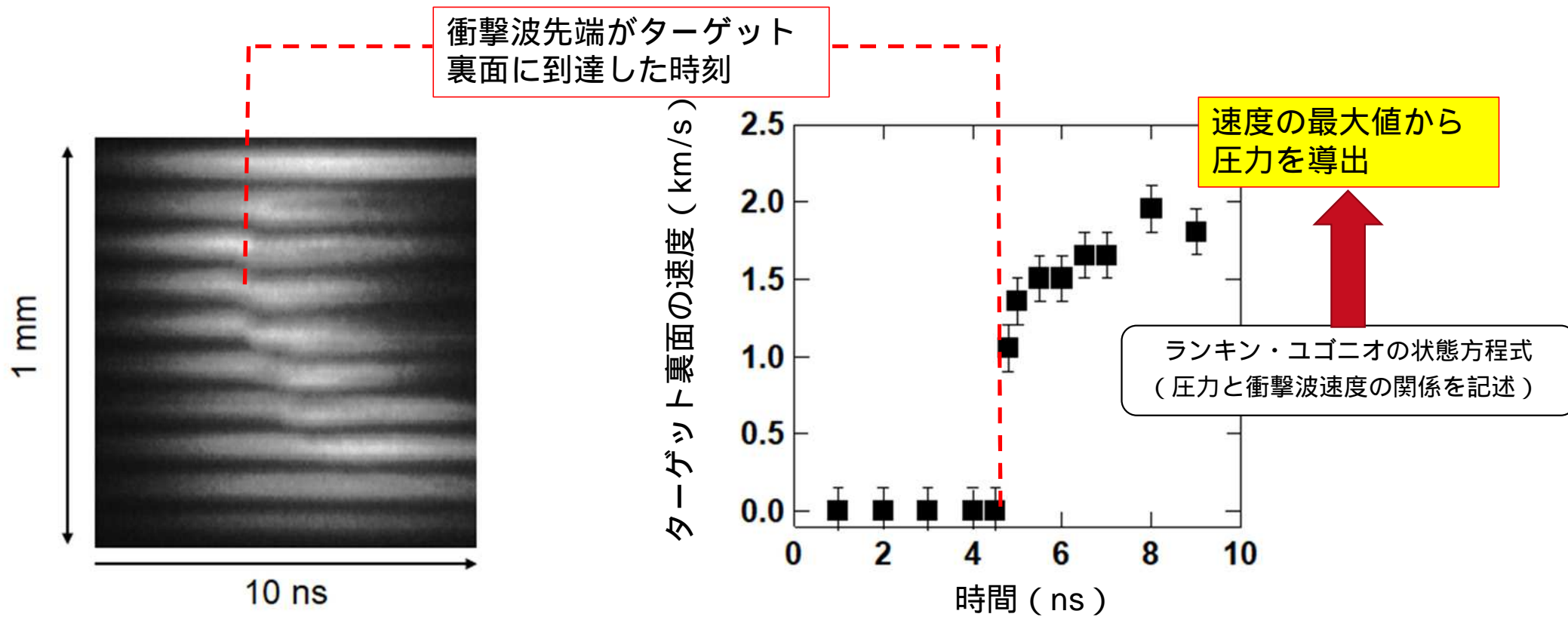
しかし干渉縞の位相変化量 $d\phi$ で見ると...

$$d\phi = -\frac{2\pi\Delta}{\lambda_0^2} d\lambda \quad \Delta: \text{光路長差}$$

例えば光路長差 Δ が 1mm 程度でも $\pi/5$ オーダーの変化として現れるため観測可能

速度干渉計 (VISAR) によるレーザー誘起圧力の評価

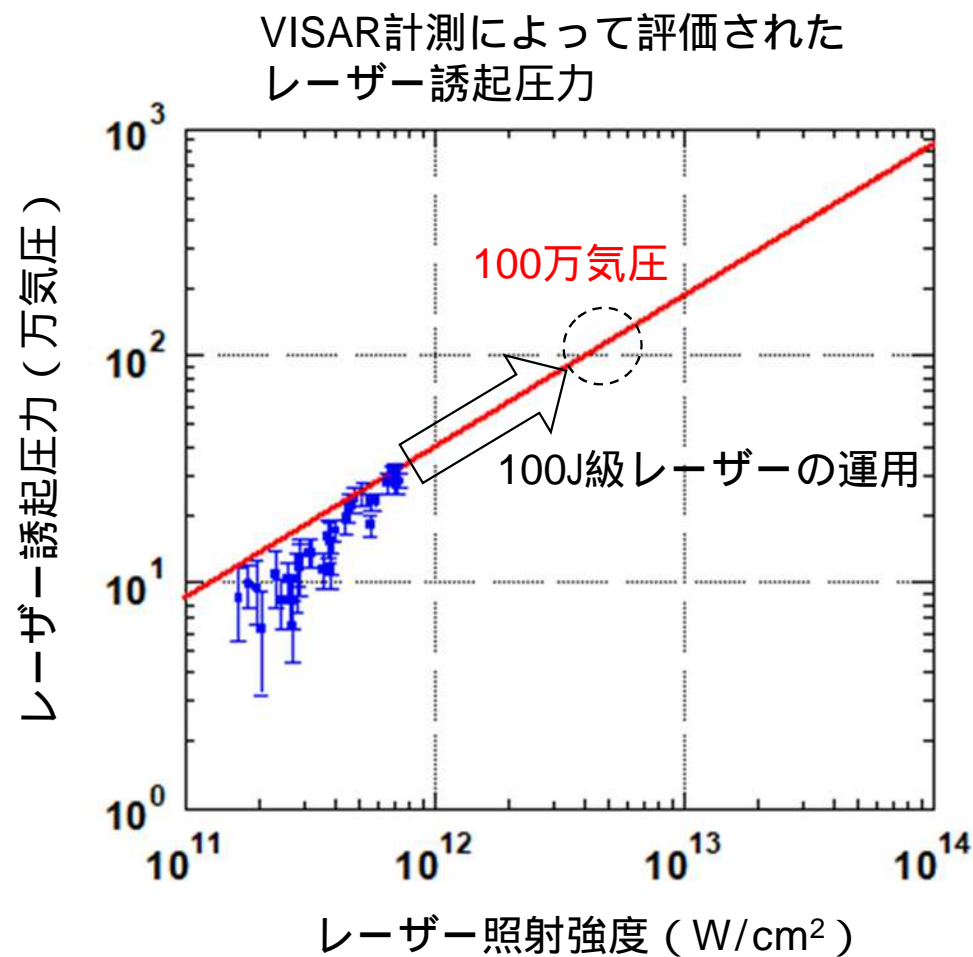
干渉縞をストリークカメラで観測することでナノ秒以下の時間分解能で位相変化を捉えることが可能



ストリークカメラによる干渉縞位相シフトの実データ

ターゲット裏面の速度変化

当社の高出力レーザーを用いた高圧発生実験の結果と今後の計画



これまでに最大で30万気圧を達成

その時のレーザー集光強度は $7 \times 10^{11} \text{ W}/\text{cm}^2$
(出力 20 J、パルス幅 10 ns、集光径 600 μm)

前述したような100J級レーザーを運用することで
当面の目標である100万気圧を目指し、様々な
応用開発に取り組んでゆく

まとめ

まとめ

■ 産業用レーザーを取り巻く状況

- ✓ 企業の開発動向は、世界規模での環境・社会問題の課題解決力を通じて収益につなげる傾向。
- ✓ 製造業における鍵となるツールとして期待されるレーザーの実用化技術の開発が急務。

■ 半導体レーザー(LD)励起セラミックスレーザーの開発

- ✓ 100J超級の繰り返し出力可能な大出力レーザーの開発が、科学分野だけでなく工業的応用への展開に向けて世界的に進められている。
- ✓ 100J×10Hzレーザー動作にはレーザー媒質の安定した冷却が課題。

■ 大エネルギーレーザーパルスの産業応用:

- ✓ レーザー誘起による衝撃波を利用することで、表面改質などの産業応用に加え、超高压状況(~400万気圧)により新材料創生など新分野への展開も期待される。
- ✓ 速度干渉計はレーザー誘起の速度を計測可能。レーザー核融合研究や新材料探索にも資する100J級レーザーを用いた超高压発生試験では必須の計測手法。

www.hamamatsu.com