

波長変換実践技術解説(1)

熱誘起位相不整合の低減(1)

(株)フotonファイブ
出来恭一

1. 熱誘起位相不整合

- ・Nd:YAG/Nd:YVO₄レーザの4倍波や5倍波のような深紫外光への波長変換では、熱誘起位相不整合(thermal dephasing)の低減が重要です.
- ・高平均出力を目指す場合には、特に重要になってきます.
- ・発生する紫外光を結晶自体が吸収し発熱することが熱誘起位相不整合の原因とされています.
- ・従って結晶に入射したビームに沿った温度分布で,
 - (1) 光軸方向では結晶後端になるほど高温となる
 - (2) ビームの入射, 出射端面内では, ビーム中心がもっとも高い温度分布となることが予想されます.

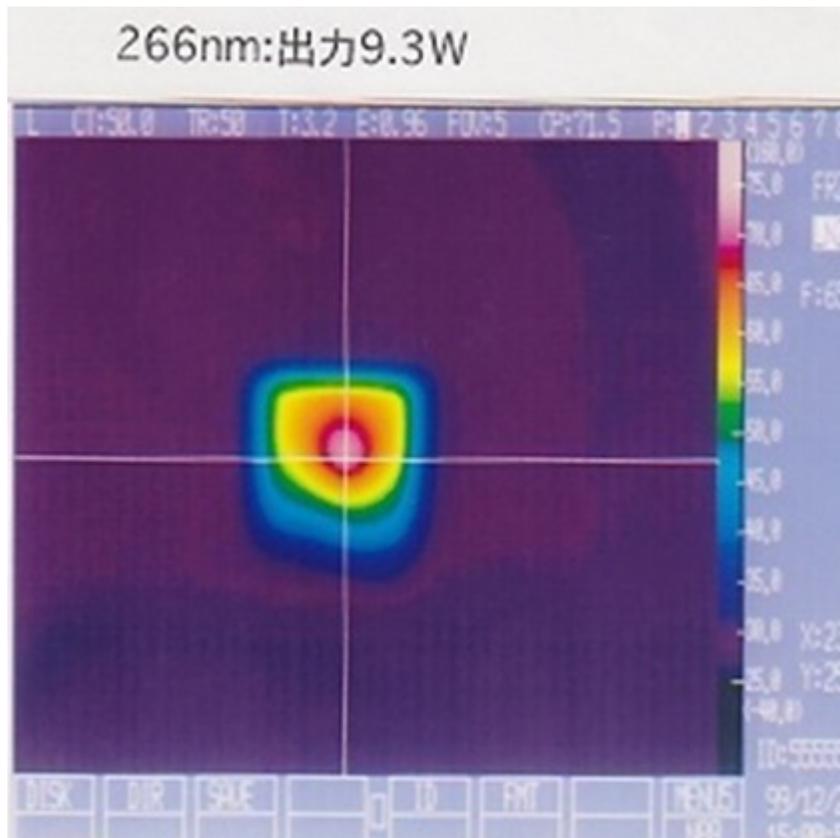
- ・熱誘起位相不整合の低減法の一つとして結晶に不活性ガスやドライエアを吹き付ける方法が知られています[1].

[1] D. EIMERL; “High Average Power Harmonic Generation”, IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. QE-23, NO. 5 (MAY 1987)575.

- ・これを筆者らが実験した結果が、次ページに示す図1です.
- ・室温窒素ガスをCLBOの出射端面に吹き付け冷却した場合とそうでない場合の266nm発生時の出射端面内温度分布の比較をしたものです.
- ・結晶後端面に約φ0.5mm程度のノズルから室温窒素ガスを吹き付けました.

・ドライ窒素ガス吹き付けによるCLBO結晶面内温度分布の変化

窒素ガス吹きつけのない場合
のCLBO後端面内の温度分布



窒素ガス吹きつけのある場合
のCLBO後端面内の温度分布

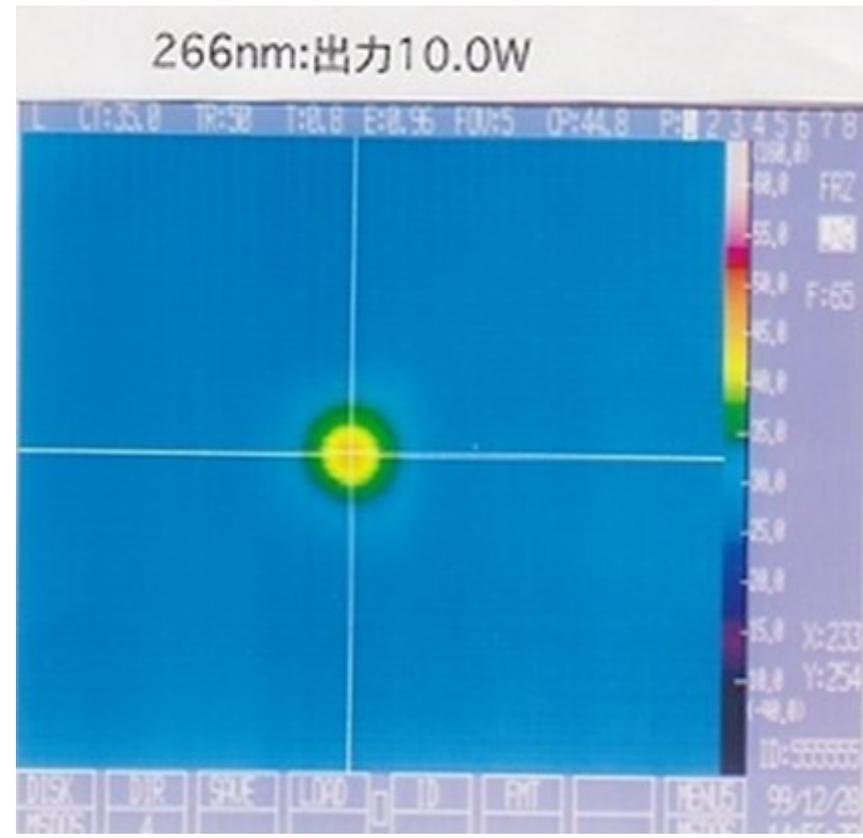


図1

- 窒素ガス冷却のない時の266nm平均出力は9.4W. 冷却のあるときは10Wとなり, 出力は, 7.5%向上しています.
- しかし, この効果は期待したよりも小さいものでした.
- 実際, 図2に示す様に, 結晶左端と中央部との温度差は, 窒素ガス冷却により大きく改善されていますが, 肝心の赤線で囲ったビーム中心部の温度勾配はそれほど改善されていません.
これが原因で出力向上は, 7.5%程度にとどまったと考えられます.

・CLBO 266nm出射短表面の温度分布(温度勾配) サーモビューアーで実測

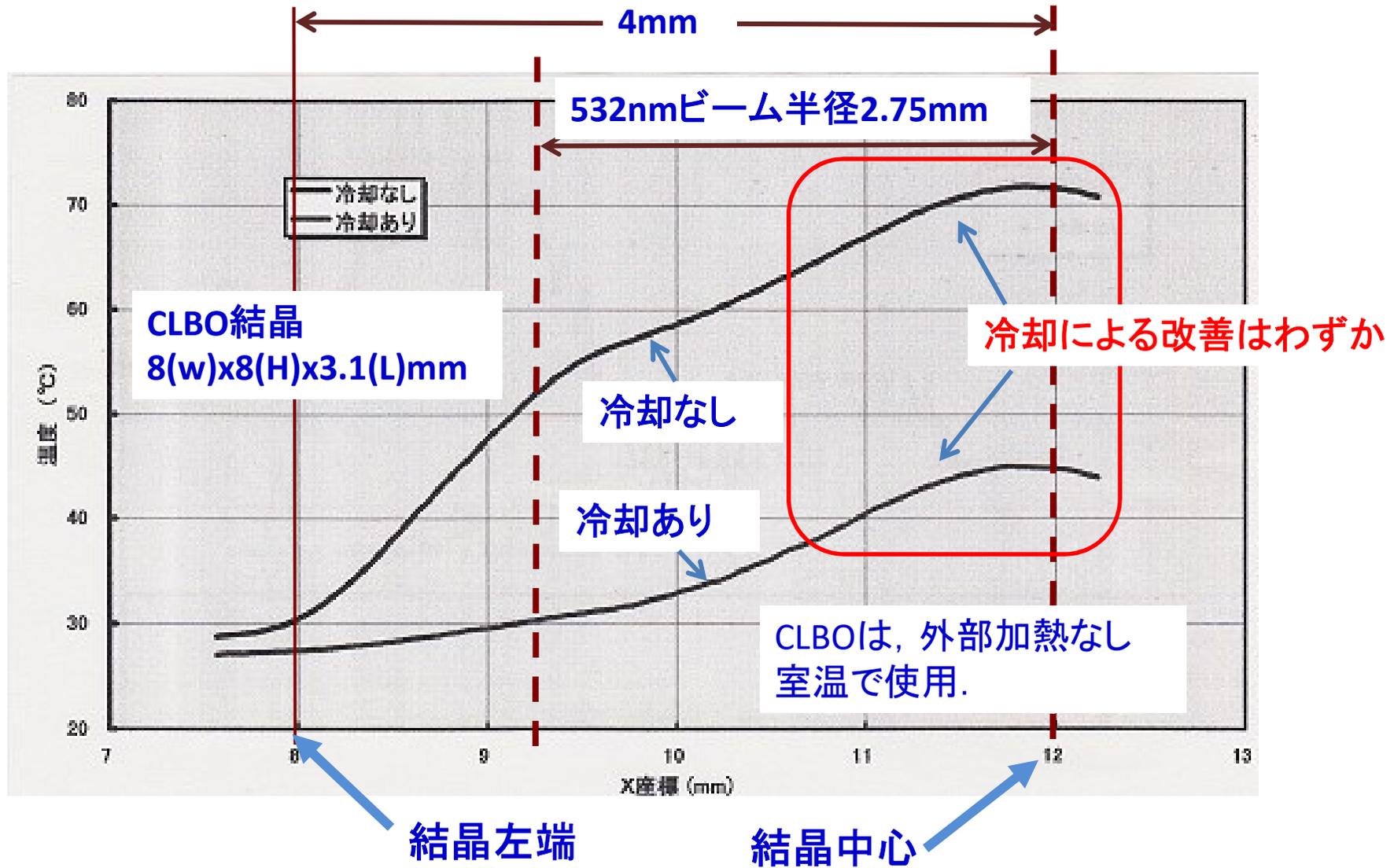
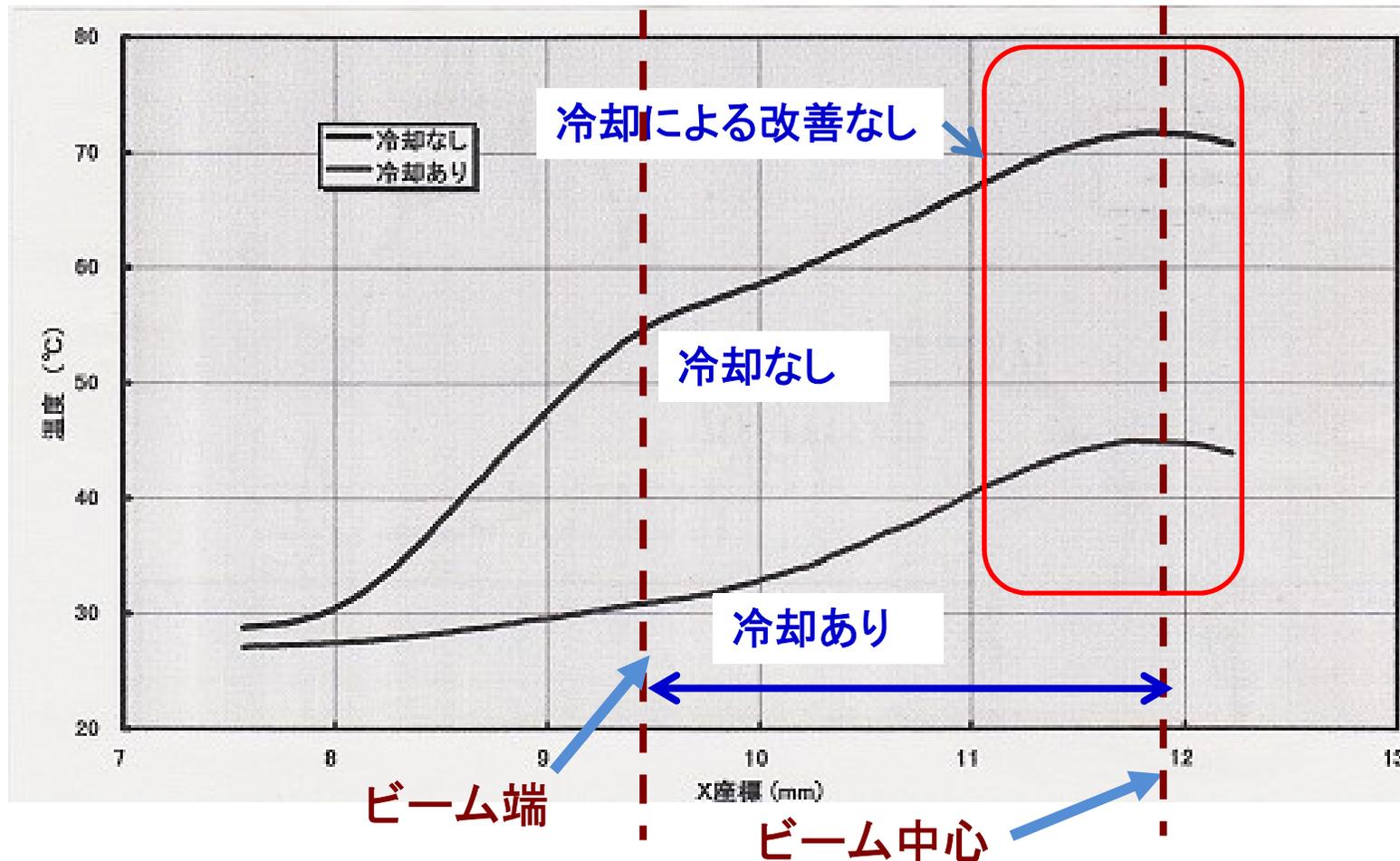


図2

●CLBO入射表面の温度分布(温度勾配)

- 窒素ガス冷却がない場合は約40度以上の温度差がある。
- 窒素ガスによる冷却を行った場合には, 全体としての温度勾配はかなり改善されているが,
- ビームが存在する結晶中央部の温度勾配は大きく改善されていない。**
- しかし結果として, 出力は9.3Wから10Wへ7.5%向上している。
- 即ち窒素ガス吹き付けによる冷却はthermaldephasingの改善には顕著な効果はないものの, 無視できない効果はあると言える。



- ・この実験の後, Yapらは, 結晶後端面内温度勾配を一層低減できるようにガス流量を適切に選び, 図2に示す様に, UV出力光がほぼ最大の時, 後端面内温度勾配がほぼゼロになるように設定しました[2].

[窒素ガス冷却の詳細]

ノズル直径0.5mm, レーザビーム中心を狙って吹き付け.

ビーム直径5.5mm, 室温窒素ガス, 流量1~5 l/min

結晶寸法22x22mm, 計測装置: JEOLサーモビューアーJTG-6300

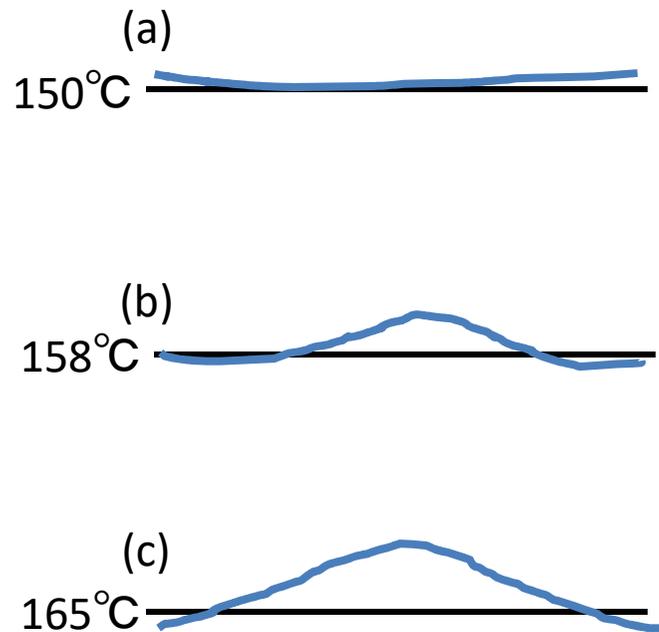
- ・その結果, 長さ10mm150°C動作CLBOで, ガス冷却のない場合の266nm出力4.2Wに対し, ガス冷却がある場合のそれは10Wを超え, **およそ2.3倍以上の出力増加を報告しています[2].**

[1] D. EIMERL; "High Average Power Harmonic Generation", IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. QE-23, NO. 5 (MAY 1987)575.

[2] Y. K. Yap et al.; "Alleviation of thermally induced phase mismatch in CsLiB₆O₁₀ crystal by means of temperature-profile compensation", OPTICS LETTERS Vol. 23, No. 13 (July 1, 1998) 1016.

[ガス冷却ない場合]

- ・UV出力増加とともに面内温度分布が(a),(b),(c)のように変化する。



UV出力なし.

UV出力増加



[ガス冷却ある場合]

- ・UV発生ない場合は, ビーム中心部は負の温度勾配をもつようにする.
- ・UV出力増加とともに面内温度分布が(d), (e), (f)のように変化する.
- ・UV最大出力時温度勾配がほぼゼロにできている. この点が図1の場合と大きく相違する.

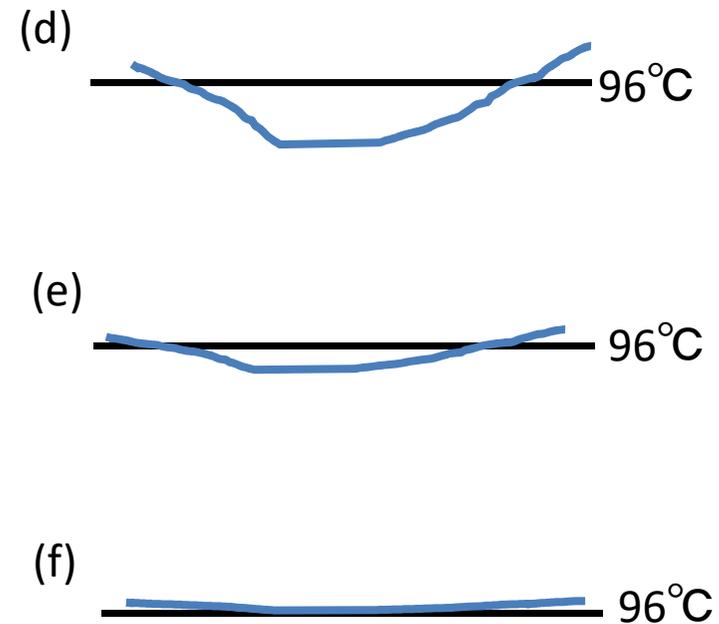
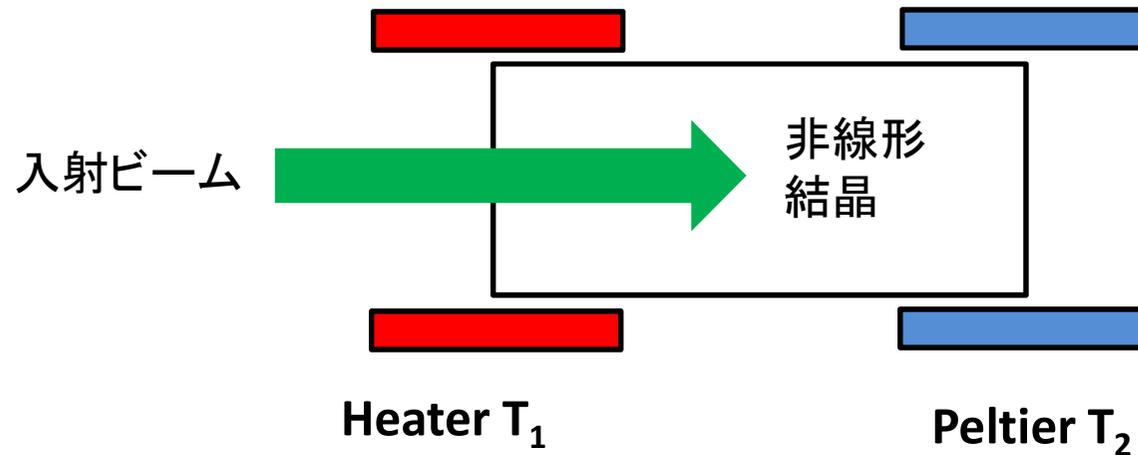


図2. 文献[2]によるCLBO後端面内温度分布の変化の概略

[補足]

- ・紫外光発生の場合には，“光軸方向では結晶後端になるほど高温となる”ことが予想され，その分，熱誘起位相不整合量が増加し，変換効率が低下すると予想されます．
- ・図2 (d), (e), (f)において，結晶全体が 150°C になるように温度制御されていますが，結晶後端面の温度は 96°C を中心に分布しています．
- ・すなわち，図2(d), (e), (f)では，**光軸方向の熱誘起位相不整合も補償していると考えられます．**
- ・結晶端面内および光軸方向の両者の熱誘起位相不整合量の低減が奏功し2.3倍もの出力増加に繋がったと思われれます．

- 実際, Yapさんは, 彼の博士論文で, 下図のような光軸方向熱誘起位相不整合の低減法を提案されています[3].



[3] Y. K. Yap; " Deep-UV generation by CLBO crystal and its utilization for CN and c-BN thin film deposition ", 大阪大学博士論文(Jan. 1999)41.

●CLBO結晶ホルダの提案

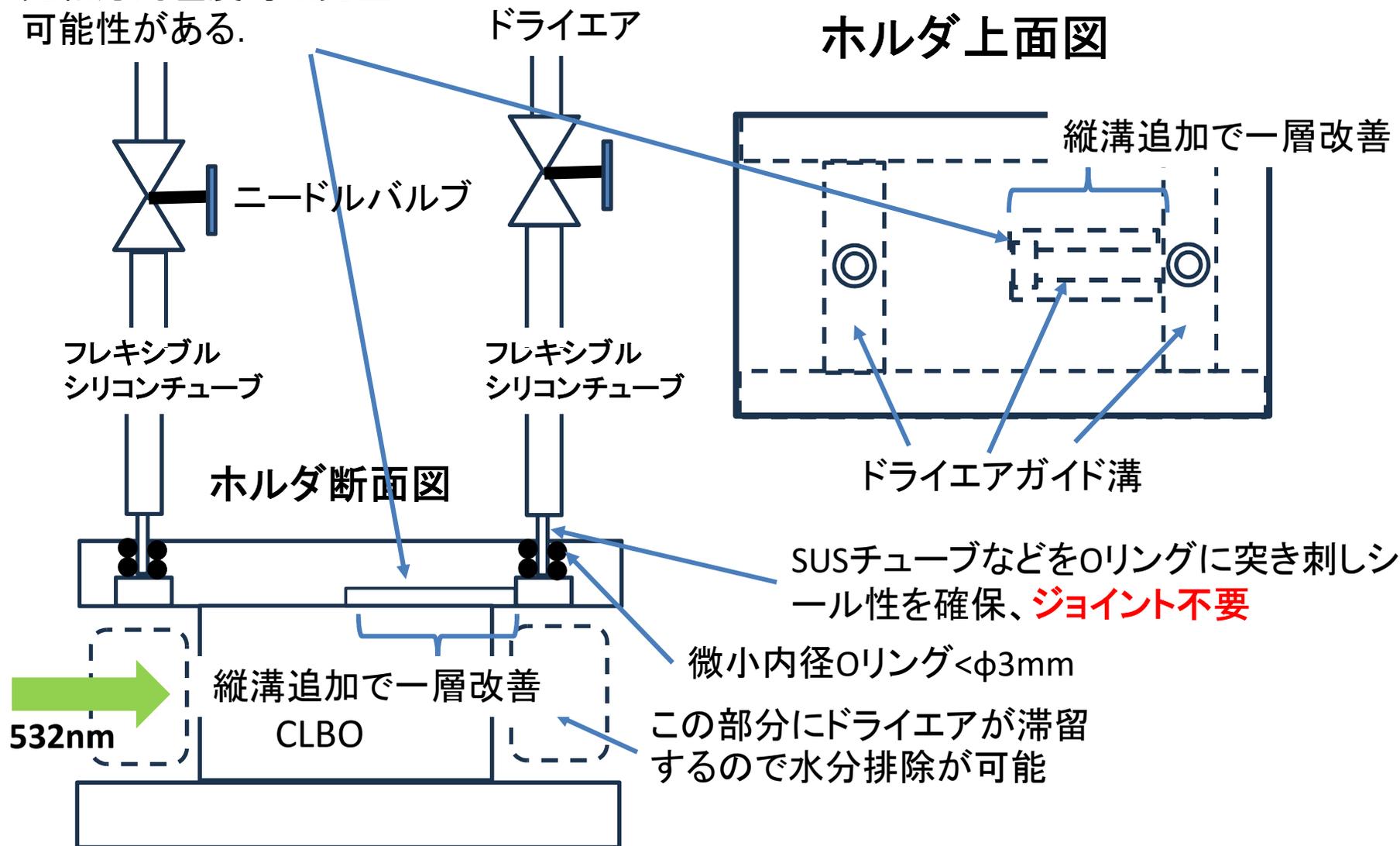
- ・以上, 述べてきたことを考慮すると, 下記構造も一つの案として浮上します.
- ・但し, CLBOで注意しなければならないのは, CLBO周囲からは, 水分を排除し, かつ結晶を150°C以上に加熱しなければならないことが報告されています.
- ・その理由は,
 - (1)130°C以上では, a軸方位, c軸法の膨張率の差による機械的結晶ひずみが緩和されること.
 - (2)水不純物がa軸方位から侵入し結晶を劣化させるとされているが, それが大気中150°Cに加熱すると48時間後には大幅に減少すると報告されていること[4],
があげられます.

**但し, この案の実施実績はありません.*

[4]吉村政志; 応用物理 第88巻 第5号(2019)334.

ニードルバルブで
流量調整してthermal
dephasingを補償できる
光軸方向温度勾配発生
の可能性がある。

CLBOホルダ天板内側からドライエアを流し
湿気を含んだ雰囲気エアとの接触を防止する
とともにthermal dephasingを補償する方法



謝辞

本資料シリーズの公開にあたり、これまで波長変換に関し多大のご指導、ご助言を賜った加藤洌先生、佐々木孝友先生、森勇介先生、吉村政志先生、浅海勝征先生、廣井得輔氏、堀口昌宏氏、横田利夫氏、佐久間純博士、大迫康博士、實野孝久先生、吉田國雄先生、山中正宜先生、P. F. Moulton博士、陳創天先生に深甚なる謝意を表明します。