

SPring-8 金属材料評価研究会(第8回)

レーザー溶接中の熔融池内流動場の リアルタイム観察及び過渡特性評価

2013年7月26日(金)

(独)日本原子力研究開発機構
敦賀本部 レーザー共同研究所
レーザー応用技術開発室

山田 知典

＜レーザー溶接＞

- ・ 日本原子力研究開発機構
量子ビーム応用研究部門
- ・ (株)松浦機械製作所
- ・ プラズマ技研工業(株)
- ・ 大阪大学 接合科学研究所
片山研究室、小溝研究室

＜レーザー切断＞

- ・ 日本原子力研究開発機構
敦賀本部 原子炉廃止措置研究開発センター
- ・ 若狭湾エネルギー研究センター
- ・ (株)レーザックス

1. 背景及び目的

2. 溶接補修技術開発

- ・溶接部の信頼性向上・残留応力制御に向けた熱流動特性評価
- ・プラントの保守保全におけるレーザー技術開発

3. 原子炉解体工法開発

レーザー金属溶断の適用とそれにおける熱流動特性把握の重要性

4. まとめ

背景及び目的

原子力分野を初め、一般産業分野にも展開可能なレーザー溶接技術開発を進めている。溶接構造物の長期間に亘る健全性を担保するためには、残留応力などに影響される機械的諸特性を、溶接中の複合物理過程と関連付けて評価する必要がある。

<残留応力の原因>

温度の時間・空間的变化により溶接部近傍の母材に生じる弾塑性歪み

従来の研究での残留応力評価

実験：溶接後の試験片

数値シミュレーション：伝熱により支配される温度の時間・空間的变化

信頼性向上、残留応力制御

温度の時間・空間的变化 ⇔ 加熱・溶融・**対流**・凝固・固相変態



[伝熱流動特性]

溶融池形状及び
溶込み深さに影響

厚板溶接：深溶込み
肉盛り溶接：溶込み抑制

X線を用いたリアルタイム観察による現象評価
⇒ 残留応力の精密な評価と制御法の確立

1. 背景及び目的

2. 溶接補修技術開発

- ・溶接部の信頼性向上・残留応力制御に向けた熱流動特性評価
- ・プラントの保守保全におけるレーザー技術開発

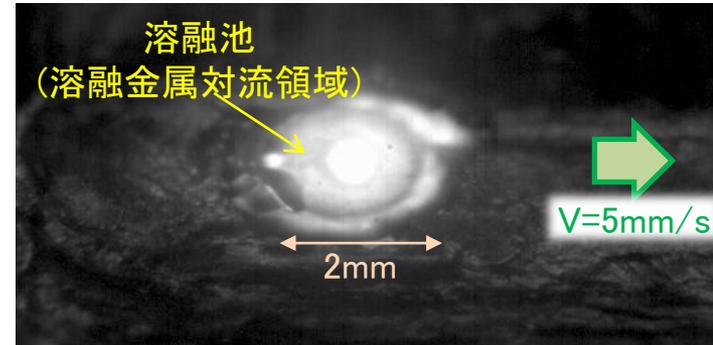
3. 原子炉解体工法開発

レーザー金属溶断の適用とそれにおける熱流動特性把握の重要性

4. まとめ

材料表面の現象把握

・高速度カメラの利用



材料内部の現象把握

・X線の利用

溶融池内部の流動場の定量評価

時間分解能 ⇒ **スペクトル強度(高輝度)**

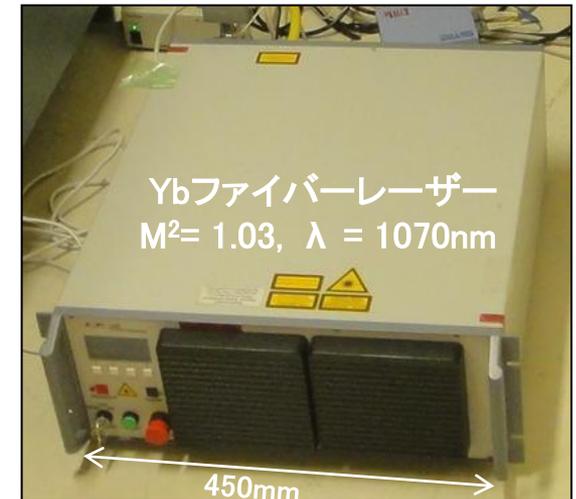
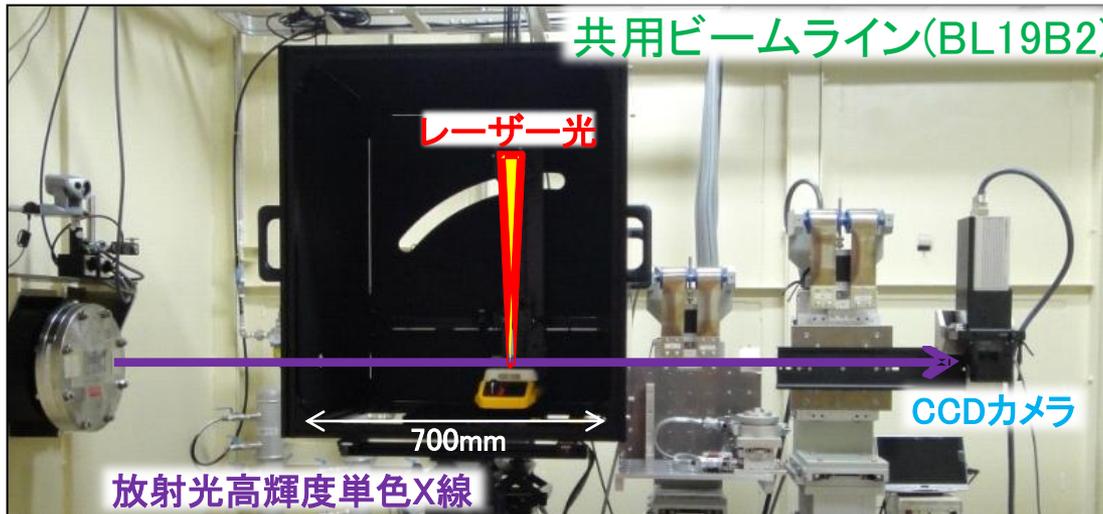
溶融池形状の時間変化

純アルミニウム: $800\text{K}-2595\text{kg}/\text{m}^3$, $933\text{K}-2385\text{kg}/\text{m}^3$: 密度差8.09%
純鉄: $1200\text{K}-7630\text{kg}/\text{m}^3$, $1809\text{K}-7015\text{kg}/\text{m}^3$: 密度差8.06%

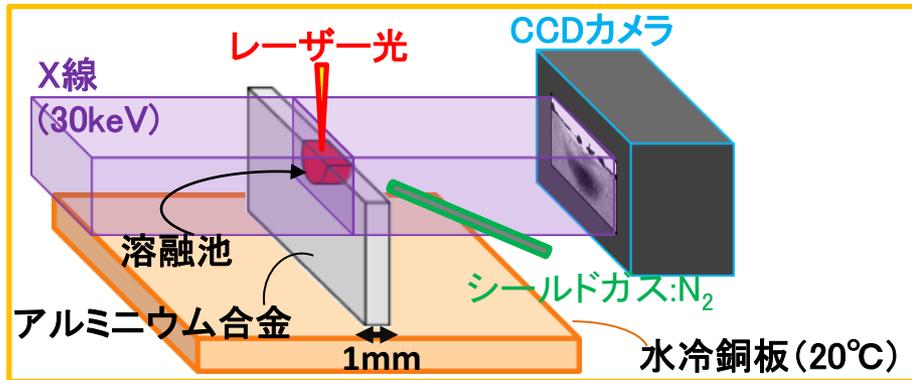
⇒ **指向性(平行ビーム)、単色性**

大型放射光施設(SPring-8)からの高輝度単色X線を利用

大型放射光施設(SPring-8)からの高輝度単色X線を利用して、レーザー照射部で形成した熔融池内部のトレーサー粒子の挙動を高コントラストイメージング法によってその場観察した。



<レーザー光固定>



- ・供試材: アルミニウム合金 (比重2.7, 融点660°C)
- ・トレーサー粒子: 炭化タンタル (比重14.65, 融点3880°C)
- ・時間分解能: 0.014s
- ・空間分解能: 37.5μm

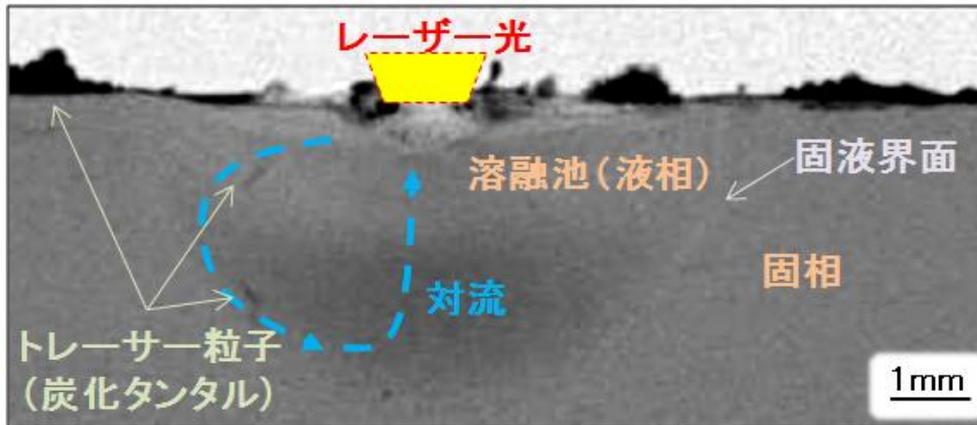
$$Pe = \frac{Q_{conv.}}{Q_{diff.}} = \frac{\rho \cdot C_p \cdot U \cdot T / l}{\lambda \cdot T / l^2}$$

Pe: Peclet number, $Q_{conv.}$: 対流による熱輸送,
 $Q_{diff.}$: 熱伝導, ρ : 流体の密度, C_p : 定圧比熱,
 U : 代表速度, T : 温度, l : 代表長さ, λ : 熱伝導率

純アルミニウムの液相の物性値と実験結果より

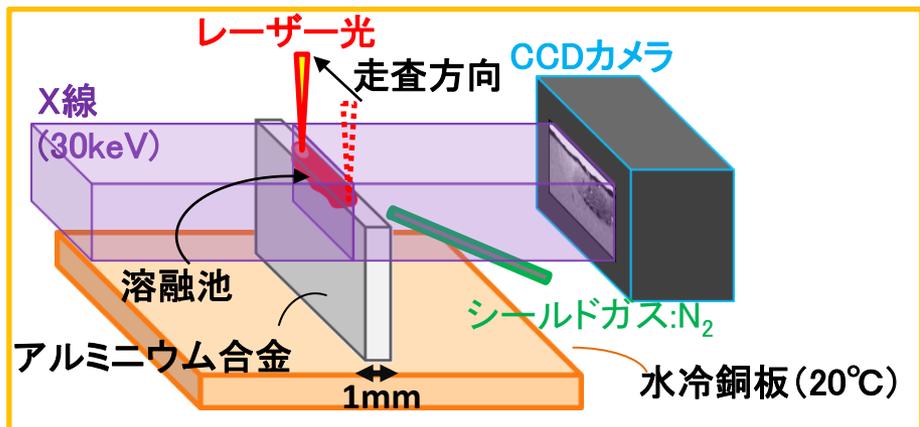
$$Pe = \frac{Q_{conv.}}{Q_{diff.}} = \frac{7.6 \times 10^9}{4.0 \times 10^9}$$

従来では、対流による熱輸送の評価が出来なかったため、熱伝導効果のみにより評価されてきたが、両者を比較すると対流による熱輸送が約2倍大きいことから、溶融池内の温度分布の評価には、対流による熱輸送の考慮が必須となる。

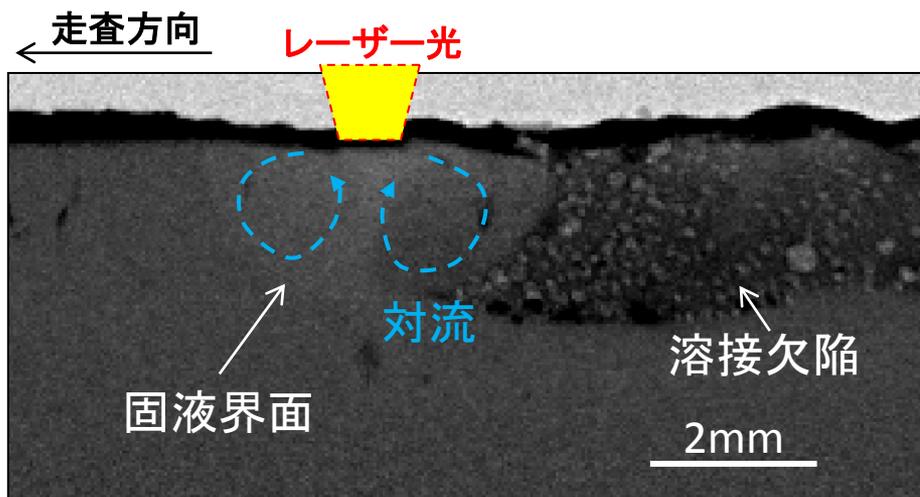


熱流動特性、レーザー光照射時間と溶込み深さの関係、内部欠陥を発生させる影響因子が明らかとなった

<レーザー光走査>



- ・供試材: アルミニウム合金 (比重2.7, 融点660°C)
- ・トレーサー粒子: 炭化タンタル (比重14.65, 融点3880°C)
- ・時間分解能: 0.014s
- ・空間分解能: 37.5μm



$$Pe = \frac{Q_{conv.}}{Q_{diff.}} = \frac{\rho \cdot C_p \cdot U \cdot T / l}{\lambda \cdot T / l^2}$$

Pe: Peclet number, $Q_{conv.}$: 対流による熱輸送,
 $Q_{diff.}$: 熱伝導, ρ : 流体の密度, C_p : 定圧比熱,
 U : 代表速度, T : 温度, l : 代表長さ, λ : 熱伝導率

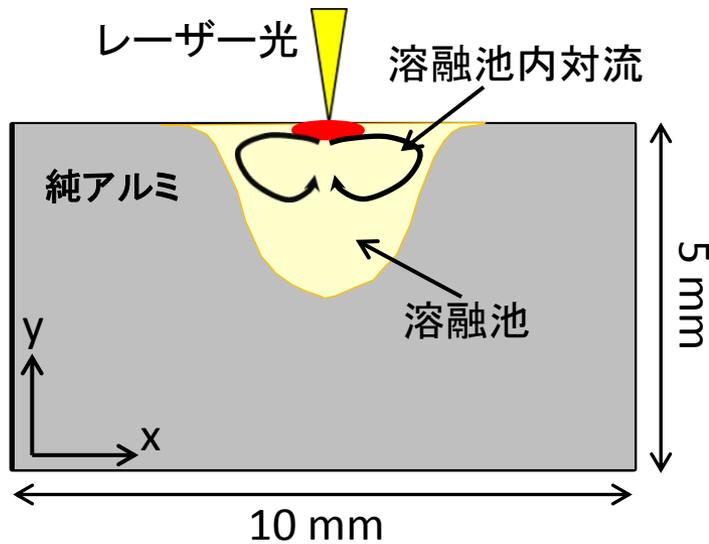
$$Pe = \frac{Q_{conv.}}{Q_{diff.}} = \frac{1.0 \times 10^{10}}{9.8 \times 10^9}$$

対流による熱輸送は熱伝導効果と同等

SPLICEコード

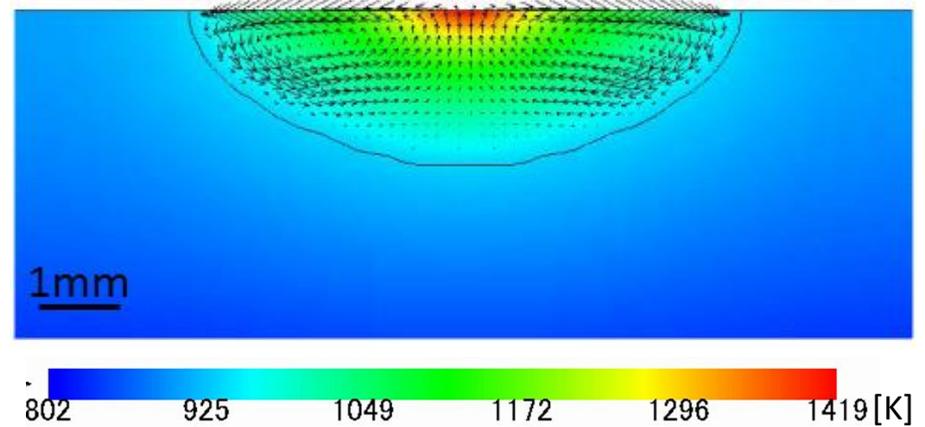
(residual **S**tress control using **P**henomenological modeling for **L**aser welding repair process **I**n **C**omputational **E**nvironment)

- ・熱流動方程式
- ・レーザー入熱(ガウスモードのビームプロファイル)
- ・溶融凝固
- ・多相
- ・表面張力(マランゴニカ)

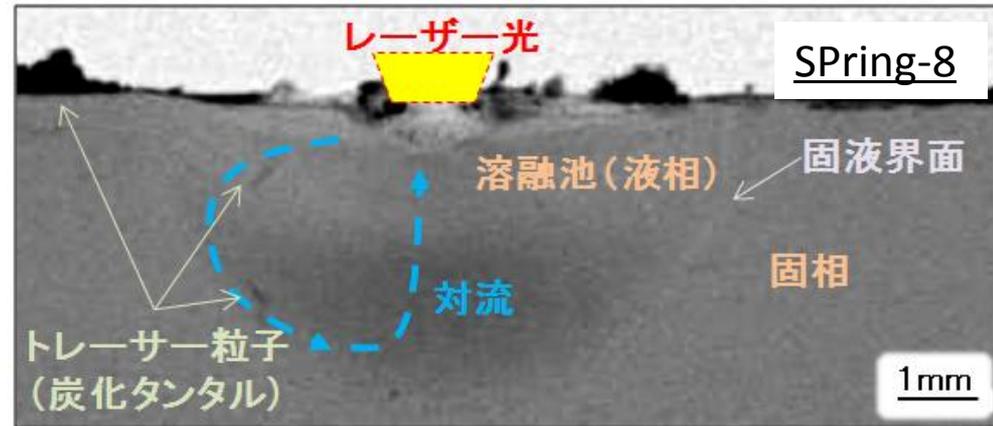


格子点数: 80 × 40

SPLICEコード



比較・検討による熱流動現象の定量化



1. 背景及び目的

2. 溶接補修技術開発

- ・溶接部の信頼性向上・残留応力制御に向けた熱流動特性評価
- ・プラントの保守保全におけるレーザー技術開発

3. 原子炉解体工法開発

レーザー金属溶断の適用とそれにおける熱流動特性把握の重要性

4. まとめ

プラントの保守保全におけるレーザー技術

国内各種プラントの経年劣化、高経年化対策

<補修ターゲット>

配管内など**狭隘部**での保守保全技術

減肉したエチレンプラント1インチ伝熱管

- ・ 管入口付近(~100mm)
- ・ 最大2mm程度の減肉(肉厚約5mm)
- ・ 周囲の一部分の減肉が進展
- ・ 縦方向に配置された配管



従来:TIG溶接トーチによる補修



WELDTEC社製マイクロ TIGトーチ 溶接棒送り治具追加



溶接の様子 <内径21.6(20A)>
⇒ 溶融池の確認不可

溶接後
ノズル先端
⇒ 損傷あり



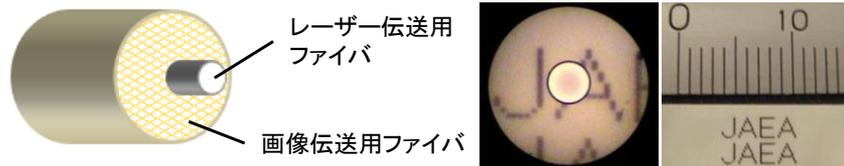
溶接ビード
⇒ 不良



レーザー溶接補修技術

非接触、エネルギー伝送が容易、高エネルギー密度...
レーザーの特長を活用することが可能

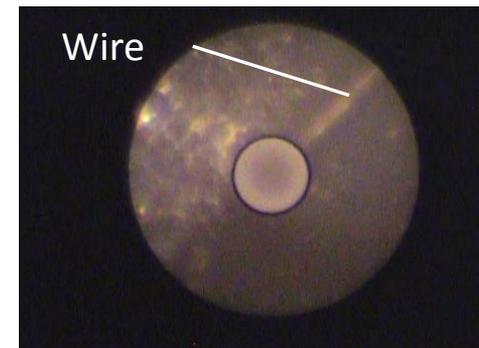
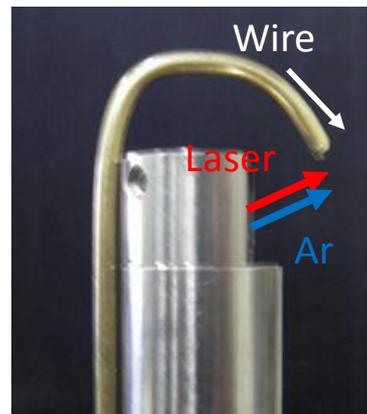
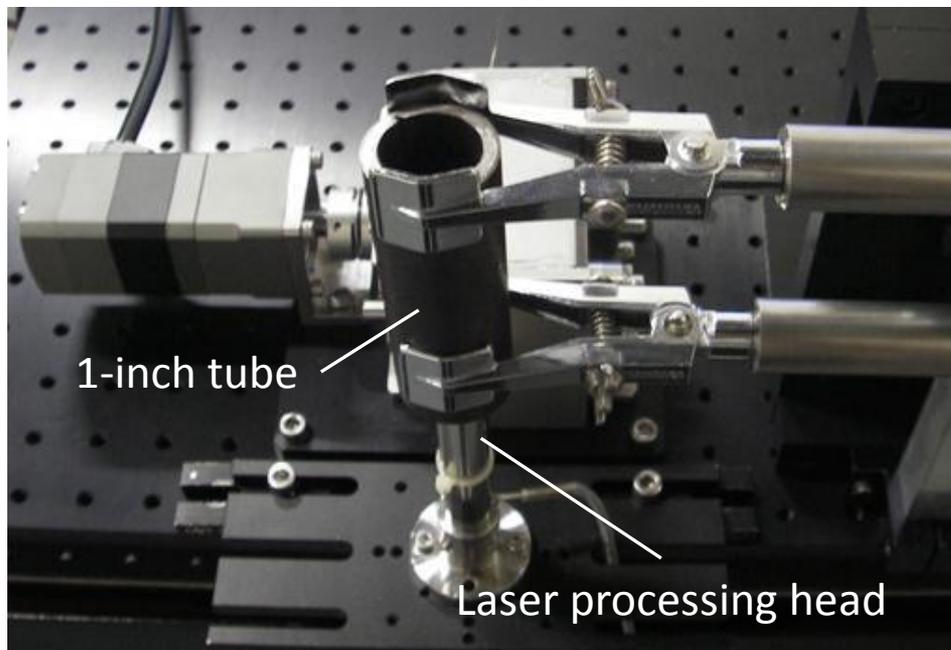
複合型光ファイバシステムの開発



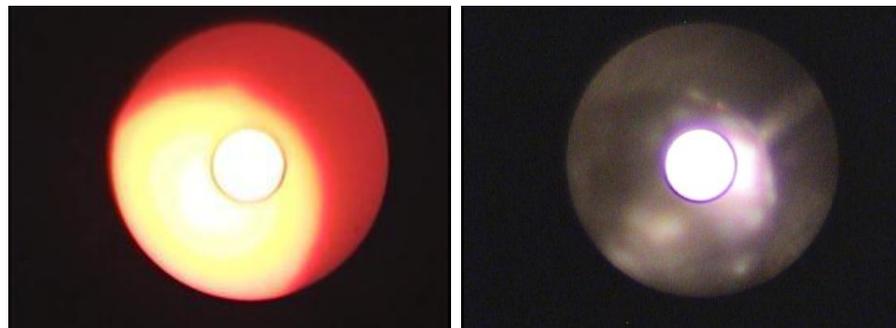
レーザー伝送用
ファイバ

画像伝送用ファイバ



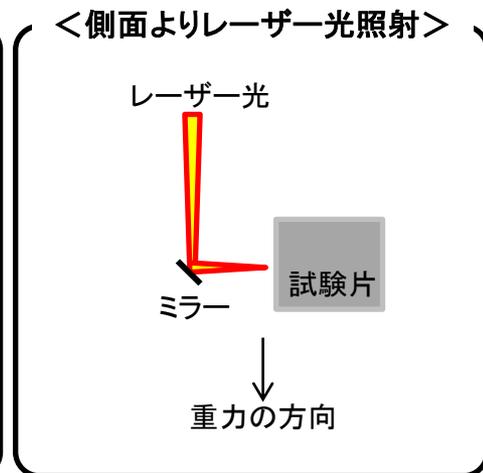
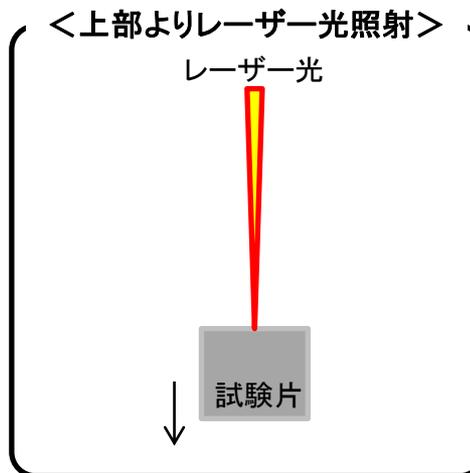
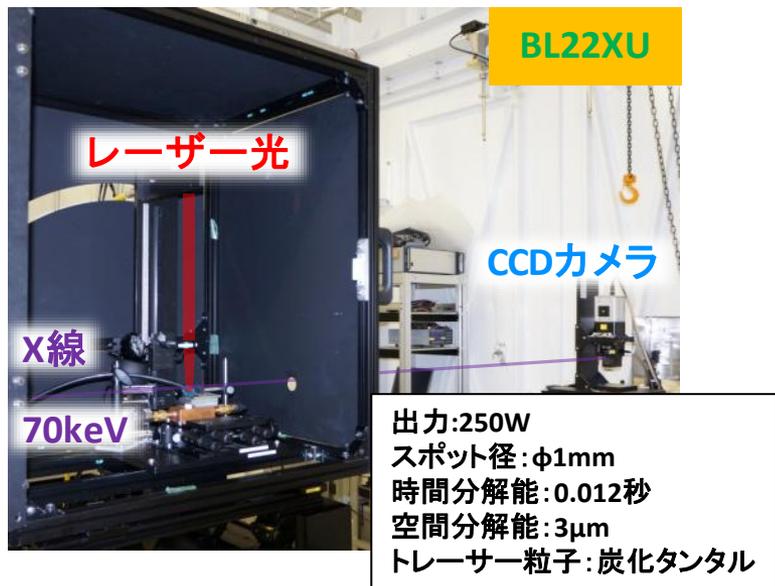


管:SS材
ワイヤ:Cr-Mo系

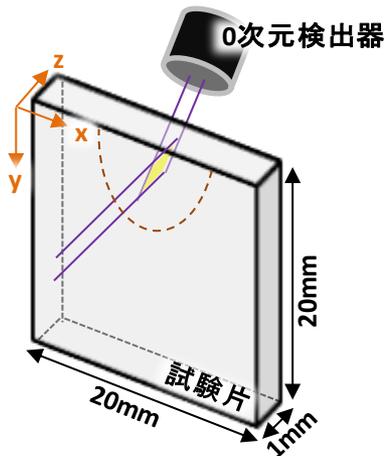
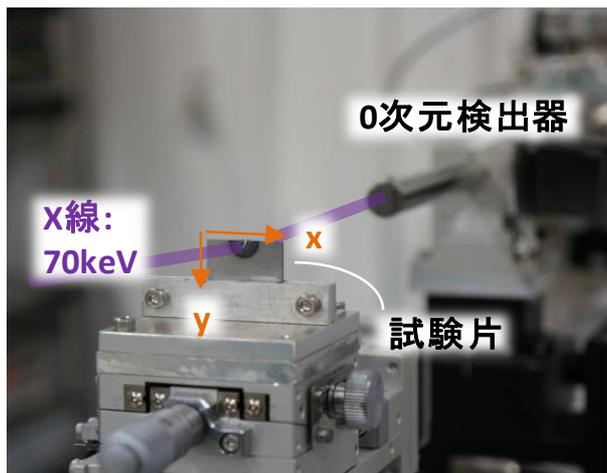


- 直径約3 mmの半球状の肉盛りを1インチ管内壁に行うことに成功
- トーチを稼働させることにより肉盛り溶接, ビード形成

<溶融池内対流挙動の観察>



<残留ひずみ分布測定>



ブラッグの式

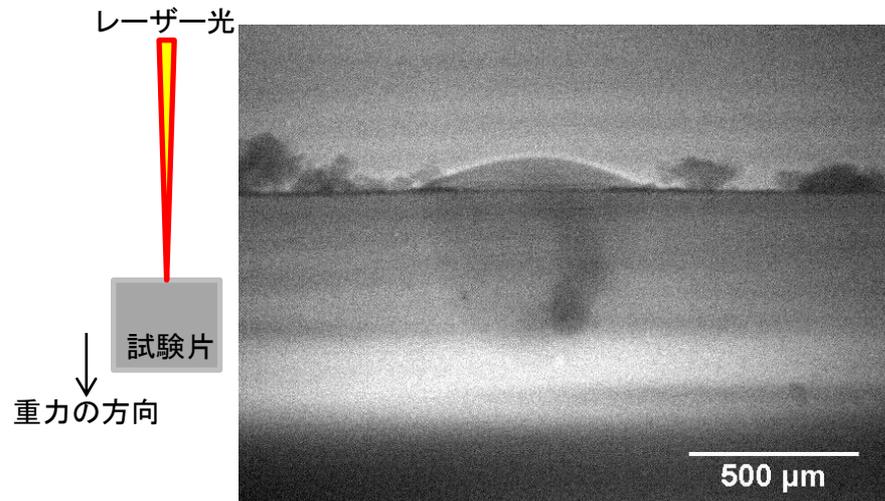
$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{1.2398}{2E \sin \theta} \quad \varepsilon = \frac{(d-d_0)}{d_0}$$

d : 格子面間隔, d_0 : 無ひずみの格子面間隔,
 λ : X線の波長, E : X線のエネルギー, ε : ひずみ

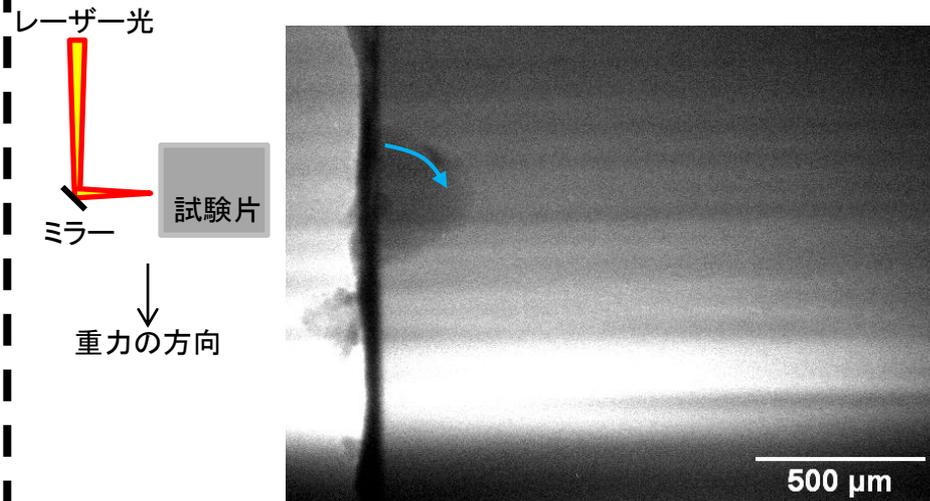
残留ひずみ分布の制御に向けて

<溶融池内流動場>

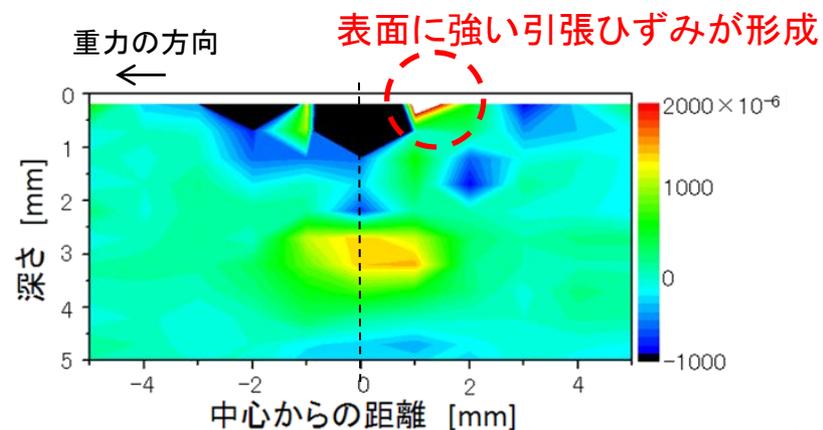
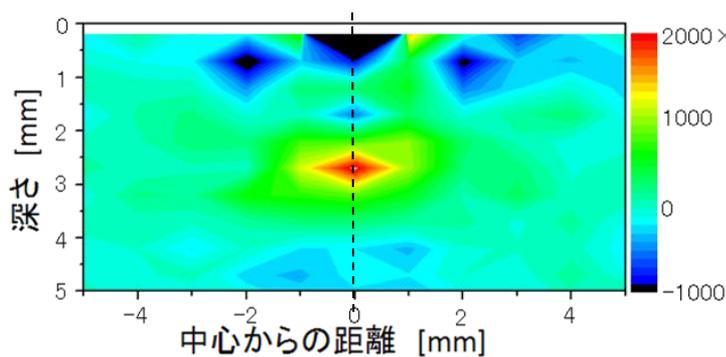
炭素鋼に上部よりレーザー光照射



炭素鋼に側面よりレーザー光照射



<残留ひずみ分布>



側面よりレーザー照射を行うと、レーザー照射部を中心に表面近傍のひずみ分布に異方性が生じる

1. 背景及び目的

2. 溶接補修技術開発

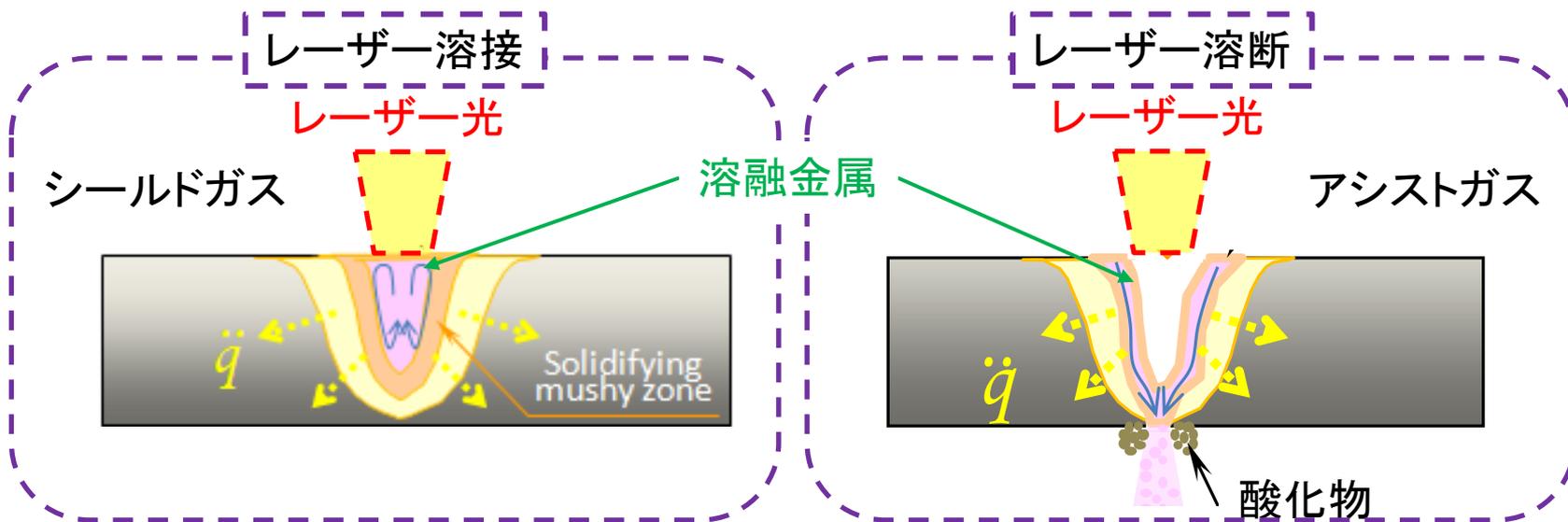
- ・溶接部の信頼性向上・残留応力制御に向けた熱流動特性評価
- ・プラントの保守保全におけるレーザー技術開発

3. 原子炉解体工法開発

レーザー金属溶断の適用とそれにおける熱流動特性把握の重要性

4. まとめ

レーザー入熱により、材料が**溶融**

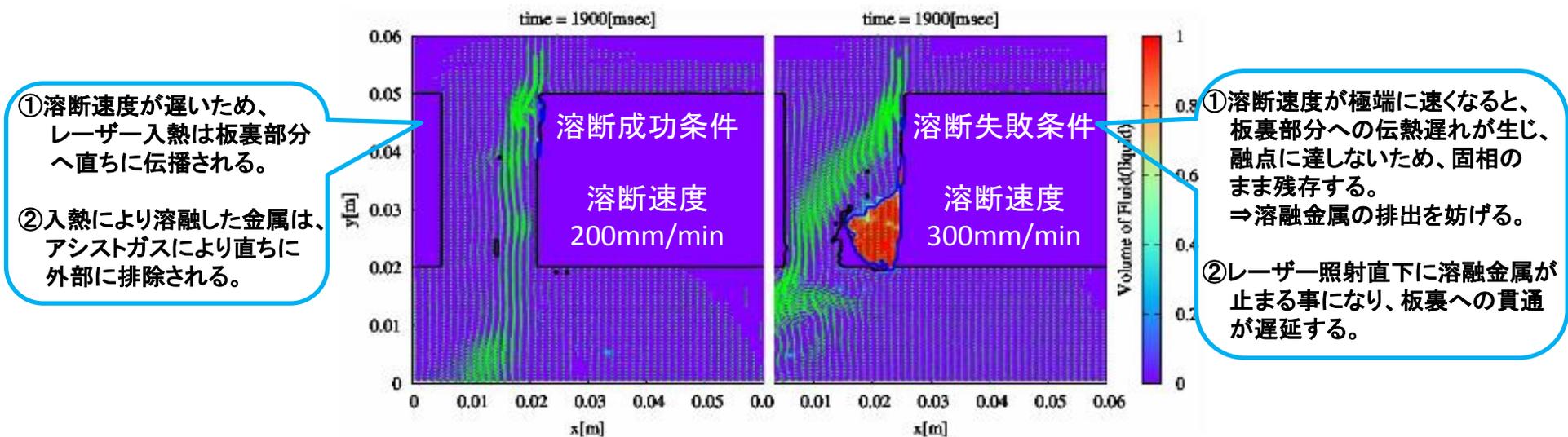
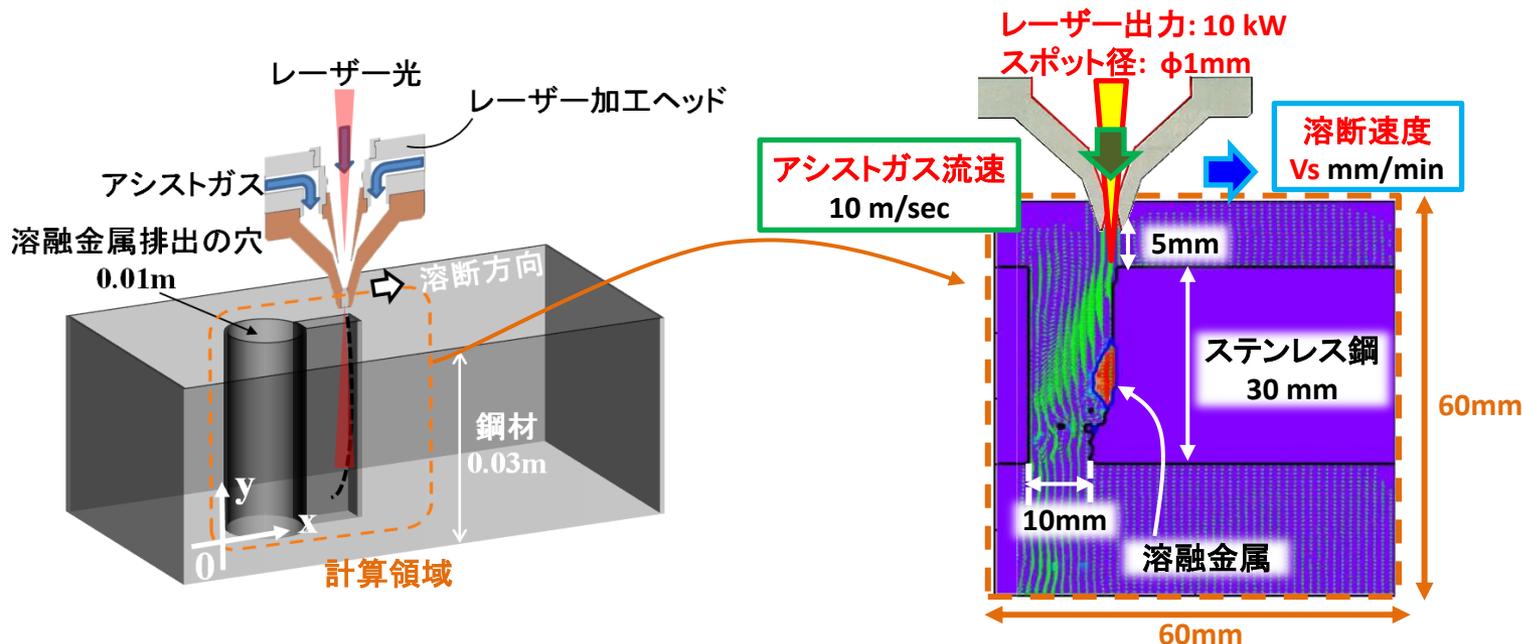


高熱伝導物質としての液体金属伝熱流動現象

溶接・溶断時の温度の時間・空間的变化 ⇔ 加熱・溶融・対流・凝固・固相変態



[伝熱流動特性]



①溶断速度が遅いため、レーザー入熱は板裏部分へ直ちに伝播される。

②入熱により溶融した金属は、アシストガスにより直ちに外部に排除される。

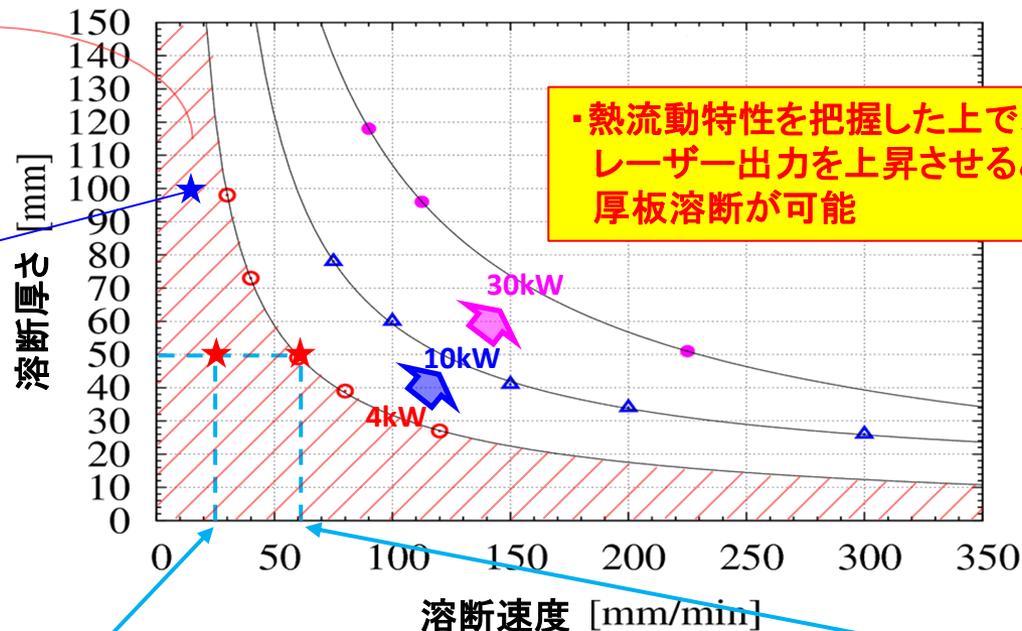
①溶断速度が極端に速くなると、板裏部分への伝熱遅れが生じ、融点に達しないため、固相のまま残存する。⇒溶融金属の排出を妨げる。

②レーザー照射直下に溶融金属が止まる事になり、板裏への貫通が遅延する。

溶断の可否を決定する一つの指標

出力4kWを用いた場合に
溶断可能な領域

実績: 出力10kWで
100mm厚を溶断



溶融した金属は、アシストガスにより直ちに外部に排除される。

50mm

24 mm/min

伝熱遅れにより生じた溶断残りが溶融金属の排出を妨げる。

50mm

60 mm/min

- 放射光高輝度単色X線を利用した高コントラストイメージング法により、レーザー光走査時の溶融池近傍における熱流動特性、溶融池形状の時間変化、内部欠陥を発生させる影響因子などを明らかにした。
- 溶融池内の流速及び溶融池形状のリアルタイム観察は、数値シミュレーションとの直接比較による熱流動特性の定量化を可能とした。
- 側面よりレーザー照射を行う場合、照射部を中心に残留ひずみ分布に異方性が生じるため、対流による熱輸送を考慮してレーザー照射条件を選定する必要がある。
- レーザー加工プロセスにおいては、熱流動特性把握が非常に重要であり、開発した数値シミュレーションコードは、厚板金属に対する溶断性能評価にも貢献する。

<論文>

- ① 5.レーザー加工のシミュレーション
山田知典, 山下晋, 杉原健太, 村松壽晴
プラズマ・核融合学会誌, 89, 7, 499-505 (2013)
- ② In-situ X-ray observation of molten pool depth during laser micro welding
T.Yamada, T.Shobu, A.Nishimura, Y.Yonemoto, S.Yamashita, T.Muramatsu
Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 7, 244-248 (2012)
- ③ Development of laser welding simulation code with advanced numerical models
S.Yamashita, Y.Yonemoto, T.Yamada, T.Kunugi, T.Muramatsu, 溶接学会論文集, 29, 48s-52s (2011)

<国際会議発表論文>

- ④ Real-time observation of laser heated metals with high brightness monochromatic x-ray techniques at present and future prospects
H.Daido, T.Yamada, S.Yamashita, K.Sugihara, A.Nishimura, T.Muramatsu, T.Shobu
The 13th International Conference on X-Ray Lasers (ICXRL2012), (2013)
- ⑤ Instrumentation device and surface control technology for coolant piping system of nuclear power plants
A.Nishimura, T.Terada, Y.Shimada, Y.Yonemoto, T.Yamada
20th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-20)(CD-ROM), ICONE20-POWER2012-54406 (2012)
- ⑥ Phenomenological evaluation of laser-irradiated welding processes with a combined use of higher-accuracy experiments and computational science methodologies (5) Numerical simulations of the welding processes with a multi-dimensional multi-physics analysis code SPLICE
S.Yamashita, T.Yamada, Y.Yonemoto, T.Kunugi, T.Muramatsu
19th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-19)(CD-ROM), ICONE19-43939 (2011)
- ⑦ Phenomenological evaluation of laser-irradiated welding processes with a combined use of higher-accuracy experiments and computational science methodologies (3) In-situ observations of welded pool using an intense X-ray beam
T.Yamada, T.Shobu, Y.Yonemoto, S.Yamashita, A.Nishimura, T.Muramatsu
19th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-19)(CD-ROM), ICONE19-44128 (2011)