

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K05359

研究課題名（和文）溶融塩高温蓄熱プラントの圧力管理を目指したレーザ加工耐熱FBGセンサの活用

研究課題名（英文）Utilizing laser-processed heat-resistant FBG sensors for pressure management in molten salt high-temperature thermal storage plants

研究代表者

西村 昭彦（Nishimura, Akihiko）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター・研究主幹

研究者番号：90370452

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：温暖化対策が喫緊の課題となる今日、太陽光・熱や風力などの自然エネルギーを変動成分を平準化する蓄熱プラントは、課題解決の切り札となる。蓄熱材料として有望なのが高温溶融塩であり、この使用においては溶融塩の圧力や流量の管理が重要となる。ピコ秒レーザ加工を用いて製作したFBGセンサの高度化を接着技術をステンレスダイヤフラムに施すことで、1MPaの圧力で動作する圧力計の試作に成功した。蓄熱材料として鉛ビスマス合金を使用し、加熱にはファイバーレーザによる遠隔加熱方式を採用した。FBGセンサ製作に関しては、民間企業への技術移転を行い、今後は様々な圧力容器や高温配管への実装を推進する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義については、先ず蓄熱プラントを我が国に導入する点から、原子力工学と保全工学の推進に関する意義が大きい。さらにピコ秒レーザ精密加工の応用という観点から、レーザ科学、レーザ加工学、スマートプロセス工学における技術貢献が挙げられる。また、FBGセンサと配管やダイヤフラムへの実装という観点から、高温での接着工学及び金属材料工学への成果波及効果が大きい。以上のように本成果は、様々な学術分野に跨る複合的な橋掛け効果としての意義がある。一方、社会的意義は、FBGセンサの製作技術の民間企業移転に成功した点である。今後は様々な工作機械への組み込みによる加工歪のオンライン計測が人材育成に役立つ。

研究成果の概要（英文）：Today, when measures against global warming have become an urgent issue, heat storage plants that level out the fluctuating components of natural energy such as solar, thermal, and wind power are a trump card in solving the problem. High-temperature molten salt is a promising heat storage material, and when using it, it is important to manage the pressure and flow rate of the molten salt. By applying advanced bonding technology to a stainless steel diaphragm and upgrading an FBGs sensor manufactured using picosecond laser processing, we have succeeded in prototyping a pressure gauge that operates at a pressure of 1 MPa. A lead-bismuth alloy was used as the heat storage material, and a remote heating method using a fiber laser was adopted for heating. The technology for manufacturing FBG sensors will be transferred to private companies, and in the future, we will promote their implementation in various pressure vessels and high-temperature piping.

研究分野：原子力工学

キーワード：遠隔計測 歪計測 レーザ精密加工 FBGセンサ 蓄熱プラント 圧力計測 技術移転

1. 研究開始当初の背景

本研究の開始は2019年度であり、この時点で既に2011年に生じた東日本大震災の影響もあり、我が国では原子力発電所が稼働停止となっていた。また、本来ならば原子力の主軸となるべき高速炉開発は、原型炉もんじゅの2次系冷却系の配管からのナトリウム漏洩により再稼働を2016年に断念していた。このため、太陽光・熱及び風力や潮汐力などの自然エネルギーの活用に注力されていた時期である。この流れは現在まで継続し、一層喫緊の課題となっている。

尚、北海道では2018年9月に北海道胆振東部地震が生じ、最大震度7の激震により苫東厚真発電所のボイラーが破裂し、北海道の半分の電力が失われた。これにより需要が供給を大きく上回ることになり、300万戸にわたる大規模停電が発生した。また、太陽光発電の導入が進む九州では、2018年10月には発電による供給が需要を上回る現象が生じ、大型の発電事業所に運転休止を依頼する必要があるが出ていた。これらの需給のアンバランスは、蓄熱プラントを既設発電所に併設する事で、影響を緩和できることを示していた。

2. 研究の目的

目的の前提として、JAEAでは超短パルスレーザーによる微細加工研究を立ち上げ、原子力の安全性向上に資する遠隔計測技術への寄与として、光ファイバコアに回折格子構造を描き込むFiber Bragg Grating(FBG)センサの開発と関連技術の開発が基盤技術としてあった。このFBGセンサの試作品を原型炉もんじゅのナトリウム流動試験ループの配管に実装し、ループの起動と緊急停止に伴う配管の熱収縮の計測に成功した。

本研究では、上記の研究成果を原子力以外の分野に波及させることを第一の目的とした。具体的には前述の背景を鑑みて、自然エネルギーの需給のアンバランスを緩和できる蓄熱プラントの我が国への導入の準備として、FBGセンサの耐熱性を活かした熔融塩蓄熱プラントの遠隔圧力計測を目的とした。

3. 研究の方法

研究の方法として、実証のための準備を構築する事、圧力計を試作する事、安全を第一としてJAEA内での実験実施の認証を得ることを目指した。

準備としては、ピコ秒レーザー加工装置の抜本的な再構成を実施した。JAEAの敦賀地区に設置していたレーザー加工装置を活用することが困難となったため、新たに民間企業に技術移転を行った。行政の資金援助も得られたため、安定的に廉価でFBGセンサの製作が可能となった。この成功が以後の研究推進の要となった。レーザー加工装置の再構成の結果、レーザー装置本体とFBGセンサ設置の機械ステージの動作安定性が格段に向上し、現時点では我が国唯一を製作できることとなった。

圧力計の試作においては、熔融塩の代替となる蓄熱材料の選定、ダイヤフラムへのFBGセンサの接着、圧力容器の製作、レーザー遠隔加熱方式の採用等の各種の技術の集大成を実施した。これらにより安全を最優先しつつ、熔融塩蓄熱プラントの圧力測定をFBGセンサを活用して実施することが出来た。

4. 研究成果

前述した研究方法に対応した成果について述べる。

(1) レーザー加工装置及び関連機器の再構成

JAEA敦賀地区設置のレーザー加工装置について、レーザー装置本体、加工用顕微鏡、レーザー伝送用光学系、光ファイバ設置のための精密駆動機械ステージ、クリーン環境・空調加工ブース、等の各構成要素に分解した上で、改めて新規部品を選定して組み立てを実施した。FBGセンサについては、以前に製作した回折格子構造を顕微鏡撮影し、FBG反射スペクトルと合わせて、回折格子の再現を試みた。FBGセンサの性能評価のための、分光器とFBG計測器も最新機器とした。設置場所はdeltafiber.jp社の社内実験室である。コロナ禍の中での感染防止のために出張は最低限に控え、Web会議と顕微画像や分光データをやり取りすることで、JAEAからdeltafiber.jp社への技術移転に成功した。

(2) 圧力測定実験

圧力測定について、以下のように実施した。まずは、本研究予算より小型ステンレス製圧力容器を製作した。圧力容器には、内部に熔融塩を模擬するための鉛-ビスマス合金を蓄熱材として封入した。この合金は、原子力では鉛高速炉の冷却材として利用される物質で、化学的に安定しており100℃以下の温度で液体となり、容器内壁に密着する。液体状態

の蓄熱材に高圧ボンベから減圧弁を通じてアルゴンガスを供給し、熔融液面を加圧した。容器にはフランジポートを設けてあり、このポートにステンレス製ダイヤモンドをセットした。ダイヤモンドは圧力により容器の外側に対して凸状に膨らむ。これをダイヤモンド外側に貼り付けたFBGセンサにより歪計測を行った。

容器の加熱に際しては、当初予定した電熱線による抵抗加熱に代わって、高出力ファイバレーザーによる遠隔加熱を実施した。これにより電熱線と容器の接触短絡や電熱線の高温破断のリスクを回避することが可能となり、容器を安全に高温に加熱することに成功した。温度計測はサーモグラフを使用し、容器の形状に合わせてレーザー照射面をスキャンすることで均一な加熱を試みた。容器内部の液体となった蓄熱材は自然対流によりレーザー照射面以外にも熱輸送を行うことで容器の過度な熱変形を防ぐことが出来た（図1参照）。

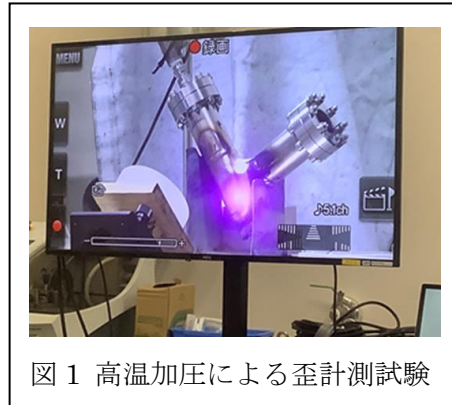


図1 高温加圧による歪計測試験

FBGセンサはダイヤモンドの中心部分にナノコロイド銀接着剤を用いて接着した。接着に先立ってダイヤモンドには金メッキを施した。接着部分は強固に保持され、アルゴンガスの加圧によるダイヤモンドの変形による歪を検出することに成功した。この成果を日本原子力学会、日本保全学会、国際会議 OPIC-LSSE にて発表した。試作したFBGセンサと歪検出部のデモ展示を OPIE2023 の企業展示にて実施した（図2参照）。

この研究成果は、現在2つの方向で活用されつつある。先ず第一に、再処理プラントの人材育成を業務とする企業との共同研究である。ここで人材育成のための訓練施設へのFBGセンサの実装と水撃作用による配管の圧力変形の検出である。加えて、管理区域内作業で使用するマニピレーターへのFBGセンサの実装である。これにより、マニピレーターによる対象物の保持力の制御が可能となる。第二の活用は、建築用材や建設重機への組み込みにより、荷重変形の遠隔監視である。具体的には、放射性物質を収納した容器重量の遠隔測定が可能となる。

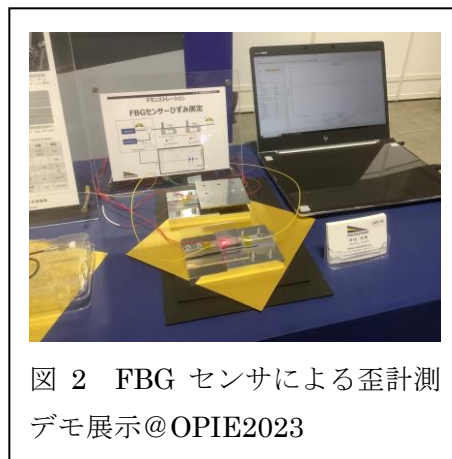


図2 FBGセンサによる歪計測デモ展示@OPIE2023

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 西村昭彦、宮部あづさ、西尾悠平、兼松学	4. 巻 50
2. 論文標題 レーザー加工で作製した耐熱FBGセンサの鉄筋コンクリート柱への現場実装の試み	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 光技術コンタクト	6. 最初と最後の頁 25-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 西村昭彦	4. 巻 19
2. 論文標題 来るべき未来の舞台	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 保全学	6. 最初と最後の頁 78-79
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 西村昭彦	4. 巻 62
2. 論文標題 原子炉廃止措置の理想、解体せずに再活用が最善	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本原子力学会誌アトムス	6. 最初と最後の頁 48-49
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 西村昭彦、井出次男、石原信之、高崎浩司
2. 発表標題 耐熱・耐放射線FBGセンサの開発と廃止措置への適用
3. 学会等名 日本保全学会第19回学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akihiko Nishimura, Tsugio Ide, Nobuyuki Ishihara, Hoji Takasaki
2. 発表標題 R&D of Heat Resistant FBG Sensors for Reactor Decommission and its Related Applications (version 2024)
3. 学会等名 OPIC-LSSE2024 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 西村昭彦、高崎浩司、石原信之
2. 発表標題 FBGセンサ歪計測技術のロボットアーム把持機構への応用
3. 学会等名 日本原子力学会2022年秋の大会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Akihiko Nishimura, Tsugio Ide, Nobuyuki Ishihara, Koji Takasaki
2. 発表標題 R&D of Heat Resistant FBG Sensors for Reactor Decommission and its Related Applications
3. 学会等名 OPIC-LSSE2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西村昭彦
2. 発表標題 10kWファイバーレーザーとロボットシステムを活用した遠隔加熱実験
3. 学会等名 日本原子力学会2021年秋の大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村昭彦、北川義大
2. 発表標題 10kWファイバーレーザーとロボットシステムを活用した遠隔加熱実験(その2)
3. 学会等名 日本原子力学会2022年春の年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akihiko Nishimura
2. 発表標題 Remote Laser Heating Experiments using a 10kW Fiber Laser with the Robot System
3. 学会等名 OPIC-LSSE2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西村昭彦、西尾悠平、兼松学
2. 発表標題 ピコ秒レーザー加工FBGセンサの鉄筋コンクリート柱への実装と計測
3. 学会等名 日本原子力学会2020年秋の大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akihiko Nishimura, Hiroshi Uechi, Tomonori Yamada, Kiyoto Kanda
2. 発表標題 Proposal of Heat Resistant FBG Sensing with Energy Harvesting for High Temperature Structural Monitoring
3. 学会等名 Annual Conference on Engineering and Applied Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 マニュアル作成WG(代表：今井達男 鹿島建設)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 光ファイバセンシング振興協会	5. 総ページ数 114
3. 書名 ポイント型光ファイバセンサ建設分野向けマニュアル	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------