

# 核融合原型炉超臨界CO<sub>2</sub>二次冷却系におけるトリチウム挙動 Tritium behavior in supercritical CO<sub>2</sub> secondary cooling system for fusion DEMO reactors

\*片山一成<sup>1</sup>, 久保海斗<sup>1</sup>, 高橋勇斗<sup>1</sup>, 大宅諒<sup>1</sup>, 芦川直子<sup>2,3</sup>, 田中照也<sup>2</sup>, 相良明男<sup>2</sup>, 石山新太郎<sup>4</sup>, 近田拓未<sup>5</sup>, 中村博文<sup>6</sup>, 八木重郎<sup>7</sup>, 田口 明<sup>8</sup>, 鳥養祐二<sup>9</sup>, 江原真司<sup>10</sup>

\*KATAYAMA Kazunari<sup>1</sup>, KUBO Kaito<sup>1</sup>, TAKAHASHI Yuto<sup>1</sup>, OYA Makoto<sup>1</sup>, ASHIKAWA Naoko<sup>2,3</sup>, TANAKA Teruya<sup>2</sup>, SAGARA Akio<sup>2</sup>, ISHIYAMA Shintaro<sup>4</sup>, CHIKADA Takumi<sup>5</sup>, NAKAMURA Hirofumi<sup>6</sup>, YAGI Juro<sup>7</sup>, TAGUCHI Akira<sup>8</sup>, TORIKAI Yuji<sup>9</sup>, EBARA Shinji<sup>10</sup>

<sup>1</sup>九大, <sup>2</sup>核融合研, <sup>3</sup>総研大, <sup>4</sup>弘前大, <sup>5</sup>静大, <sup>6</sup>量研機構, <sup>7</sup>京大,

<sup>8</sup>富山大, <sup>9</sup>茨城大, <sup>10</sup>東北大

<sup>1</sup>Kyushu Univ., <sup>2</sup>NIFS, <sup>3</sup>SOKENDAI, <sup>4</sup>Hirosaki Univ., <sup>5</sup>Shizuoka Univ., <sup>6</sup>QST, <sup>7</sup>Kyoto Univ., <sup>8</sup>Univ. of Toyama, <sup>9</sup>Ibaraki Univ., <sup>10</sup>Tohoku Univ.

## 1. 緒言

核融合炉の安全上もっとも重要となるのが、トリチウムを環境に放出することなく、施設内に安全に閉じ込める技術の確立である。そのためには、核融合炉施設各所におけるトリチウムの挙動を把握する必要がある。ヘリカル型核融合原型炉 FFHR-d1 設計では、溶融塩 Flinabe ブランケットと超臨界 CO<sub>2</sub> 二次冷却系による、水を用いない発電システムが採用されている<sup>[1, 2]</sup>。超臨界 CO<sub>2</sub> ガスタービンシステムは、コンパクトで高い発電効率の発電システムとして開発されているが、核融合炉への適用にあたっては、システム内でのトリチウム存在化学形や金属材料への溶解・透過挙動の理解が不可欠である。そのため、超臨界 CO<sub>2</sub> の化学的特性を把握し、酸化膜の成長や浸炭現象など複雑な物質移動が生じる CO<sub>2</sub>-金属界面でのトリチウム挙動の解明が求められている。本研究では、トリチウム使用が可能な超臨界 CO<sub>2</sub> 試験装置を九州大学に整備し、高温高压 CO<sub>2</sub> 環境下でステンレス鋼容器内に生じる反応生成物の分析から開始した。本発表では、これまでに得られた結果と今後の計画について報告する。

## 2. 実験内容

図 1 に装置概略図を示す。真空置換型グローブボックス内に設置したステンレス鋼 (SS304) 製の直管 (外径 42.7mm, 厚み 3.6mm, 長さ 350mm, 内容積約 346 cm<sup>3</sup>) に CO<sub>2</sub> ガスを導入して密封し、電気炉を用いて昇温することで超臨界 CO<sub>2</sub> (超臨界条件: 温度 31.1℃ 以上, 圧力 7.38MPa 以上) を生成する (図 2, 3)。設計温度は 500℃、設計圧力は 11MPa である。温度は高压容器内部の中央に挿入した熱電対で制御する。

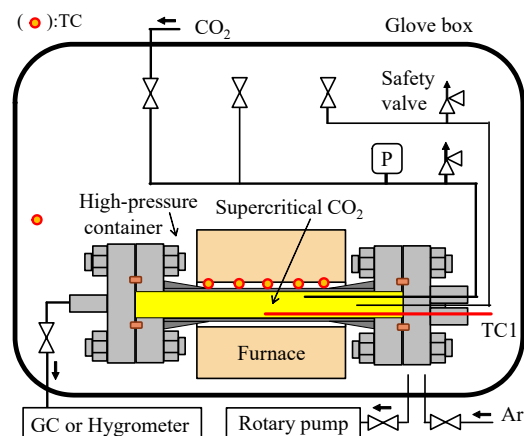


図 1 超臨界 CO<sub>2</sub> 試験装置の概略図

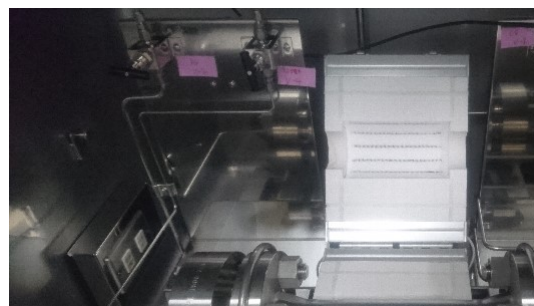


図 2 ステンレス鋼(SS304)製の直管

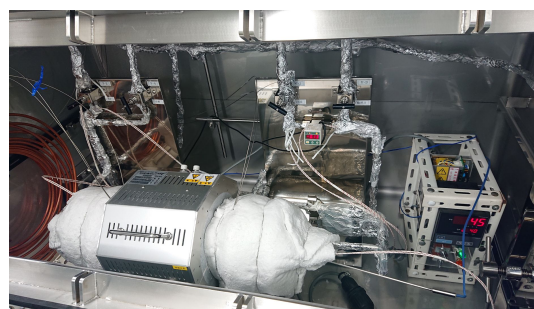


図 3 超臨界 CO<sub>2</sub> 試験装置の写真

本実験では4回の加熱実験を行った。高压容器にCO<sub>2</sub>ガスを封入し、250℃から450℃まで50℃ずつ段階的に昇温し、各温度で30分および90分保持した後、ガスの一部を排出して、ガスクロマトグラフ（1, 2回目）あるいは水分計（3, 4回目）で気相成分を分析した。1, 3回目の実験では適宜ガスを排出することで超臨界圧以下となるように調整し、2, 4回目ではできるだけガスを排出せず、臨界圧以上を維持した。図4に2回目の実験におけるCO<sub>2</sub>温度、CO<sub>2</sub>圧力及びピステンレス鋼容器外壁温度を示す。

### 3. 結果及び考察

350℃以上では、高压容器から排出されたCO<sub>2</sub>中にCO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>が検出された。3成分について、実験1回目、2回目とも、30分後よりも90分後の濃度が高く、これはCO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>の生成反応が平衡に達していないことを示す。図5、6、7に90分保持後のCO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>濃度を温度に対してプロットする。3成分とも温度の上昇とともに濃度も上昇する傾向が見られた。また、実験1回目に対して実験2回目の濃度が格段に低いことがわかった。実験3, 4回目の水分計による分析では、水分濃度は20~30 ppm程度で温度、圧力による変化はみられなかった。そのため、反応生成物の形成には、不純物水蒸気は寄与していないと言える。CO<sub>2</sub>とCOの熱力学的平衡状態では、観測されたCO濃度よりも高い濃度となることから、2回目の実験でCO濃度が低下したのは、高压容器表面でのCO生成反応速度が低下したためと考えられる。H<sub>2</sub>は高压容器ステンレス鋼に溶存していた水素の加熱による脱離、CH<sub>4</sub>はCO形成に伴い生じた炭素と脱離水素との反応によると考えている。

今のところ、次のような反応生成物発生モデルを提案している。SS304とCO<sub>2</sub>ガスとの界面において、FeとCO<sub>2</sub>の反応により、酸化層(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)が形成されるとともにCOやCが生じる。SS304中には溶解水素Hが存在していることから、加熱によりH<sub>2</sub>が気相中へ放出される。H<sub>2</sub>の一部は、上記の反応で発生したCと結合し、CH<sub>4</sub>が生じる。実験1で酸化層が形成されるとFeやHの表面への移動抵抗となり、酸化層の成長速度が低下し、COとH<sub>2</sub>の生成速度も低下する。これによりCH<sub>4</sub>の生成速度も低下する。今後、金属試料を高温高压CO<sub>2</sub>ガスに暴露し、金属表面分析を実施してモデルの妥当性を検証する。

#### 参考文献

- [1] A. Sagara et al., Fusion Sci. Technol., 68 (2015) 303-307.
- [2] S. Ishiyama et al., Fusion Sci. Technol., 75 (2019) 862-872.

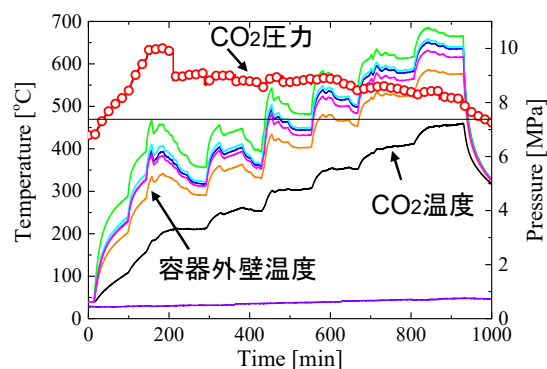


図4 超臨界CO<sub>2</sub>条件 (7.38MPa 以上)

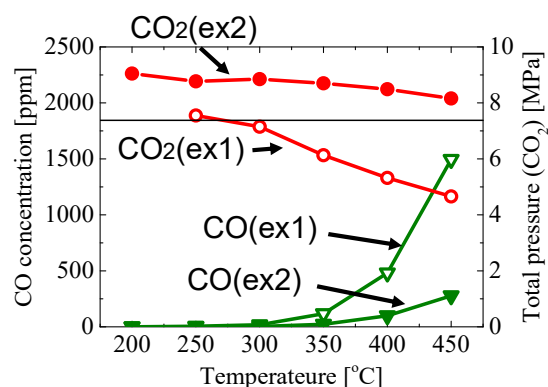


図5 実験1と2でのCO濃度変化の比較

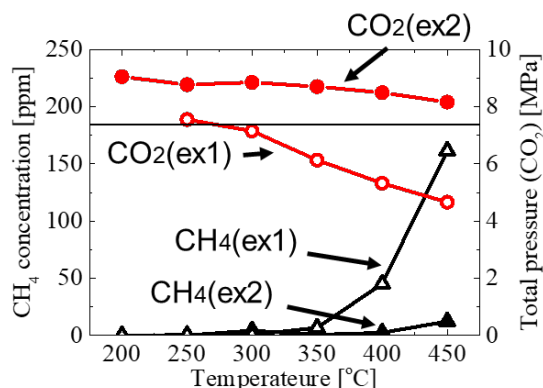


図6 実験1と2でのCH<sub>4</sub>濃度変化の比較

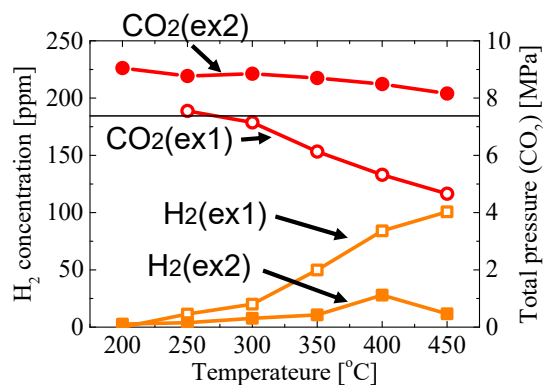


図7 実験1と2でのH<sub>2</sub>濃度変化の比較

**謝辞** 本研究は核融合科学研究所LHD計画共同研究(NIFS17K0BF037)の支援のもとに実施された。