

## 高温プラズマ材料技術のこれまでの進展と展望

### Progress and Prospects of High-Pressure Thermal Plasma Material Technology

金沢大理工<sup>1</sup>, °田中 康規<sup>1</sup>

Kanazawa Univ.<sup>1</sup>, °Yasunori Tanaka<sup>1</sup>

E-mail: tanaka@ec.t.kanazawa-u.ac.jp

高気圧熱プラズマは、ガス温度自身が数万 K にも及ぶ高温プラズマの一つである。熱プラズマの応用は歴史が古く、1802 年には電極間アーク放電の形で生成され、アーク灯、溶接アークへの応用が今から 200 年も以前に登場する。この長い歴史にもかかわらず、2021 年現在も熱プラズマ・アークの研究は廃れることなく、基礎物理研究と応用高度化研究とが混在し続けられている。これは熱プラズマ・アーク現象が包含する物理現象が極めて複雑で深いものであり、かつ実用に極めて有用な性質を有しているためといえる。

熱プラズマ・アーク放電はガス温度が数万 K 程度にもなる高温プラズマで、さらにある条件によっては局所熱平衡(LTE)状態の近似がある程度成立するプラズマとして認識されている。ガス温度が 10000 K を超える媒体は、燃焼などの化学反応では得られず熱プラズマ・アークの大きな利点のひとつである。熱プラズマはガス温度が高く熱容量が極めて大きく、基本的にどのような材料も熔融・蒸発・原子化できる。そのため、熱プラズマ・アーク放電の系においては固体・液体・気体との双方向性の強い相互作用（質量・運動量・エネルギー変換）を有し、これが材料大量処理・生成につながる。さらに熱プラズマ・アーク内の流れは一般には乱流である。これらからの放射光もエネルギーバランスの大きな要素となる。この極めて複雑で激しく時空間のマルチスケールを含む現象で、実験的なアプローチも難しかった。そのため 1980-1990 年代では現象論的なアプローチが多く、その知見は限られてきた。このような困難さの上に理解と応用とが進められ、アーク放電は特にアーク溶接・アーク溶融・プラズマ切断で産業上の大きな役割を果たすに至っている。この複雑現象を把握しえるに至ったのも、1990 年代以降のことである。例えば溶接アークの中の温度分布と、溶融材料と溶融池流動現象の関係が明らかになったのはここ 20 年間のことである。これらは偉大な先人の方々の弛まぬ努力と、計測技術の発達による状態把握、材料の基礎物性のデータの蓄積、計算機による大規模な数値解析がソフト・ハードの両面から可能となったためである。特に数値解析技術の発達は、複雑系理解に対して非常に大きな力となっている。

現在、熱プラズマ・アークの研究は急激な進展を遂げている。その現象解明へのアプローチには、LTE 仮定を必要としない電子密度測定、干渉法等による 2 次元密度分布測定、金属蒸気などの不純物分布とその輸送測定、固体溶融状態の把握、乱流構造の測定などのアプローチがされている。数値解析では LTE 近似による電磁熱流体解析は 3 次元化されるとともに、固体材料の熔融・蒸発を含む相転移による影響とこれらの把握が発達してきている。その応用分野としてもこれまでの接合・スイッチングのほか、新材料創生、機能性厚膜生成、ダイヤモンド生成、機能性ナノ粒子・ナノ材料の大量生成、超高速表面改質などが進みつつある。今後、これらの研究は精度良い予測モデルの構築、膨大な数値解析データと実験データの有効活用と、それらを用いた新しい大量材料生成・生産などに新しいステージに移行しつつある。