

本稿では、加熱原理による浮遊帯域溶融（Floating Zone: FZ）法の分類について述べる。近年の加熱原理の進展や半導体レーザー等の技術革新により、高温度化、温度勾配の急峻化、および高度な雰囲気制御が可能となった。これら最新の手法について、いくつかの適用事例を交えて概説する。

浮遊帯域溶融（FZ）法の概要と原理

FZ法は、1950年代初頭にウィリアム・G・ファン（William G. Pfann）が発明した「ゾーン精製法」が起源です。これを元に、1952年以降、ヘンリー・シューラー（Henry Theurer）がルツボを使用しない縦型の浮遊帯域溶融技術へと発展させました。原料ロッドの一部のみを局所溶融し、表面張力によって溶融帯を保持しながら、上下ロッドの連動制御によって溶融帯を移動させて単結晶を育成する。ルツボを使用しない（無容器）ため、ルツボ由来の不純物汚染がなく、超高純度材料や超高融点・高反応性材料の育成が可能であるという大きなメリットを持つ。一方で、溶融帯が不安定になりやすい点や、非調和溶融化合物への適用には相制御の工夫が必要であるといった課題もある。

加熱原理によるFZ法の分類

結晶への入熱（加熱原理）の違いにより、FZ法は主に以下の5つに分類され、対象材料の特性（融点・導電性・溶融挙動）に応じて使い分けられる。

方式	加熱原理	主な対象	温度勾配	雰囲気制御
誘導加熱FZ (RF)	渦電流による自己発熱	導電性材料: Si, Ge、高融点純金属、金属炭化物、金属ホウ化物等	急峻	やや制限あり
抵抗加熱FZ	ヒーターの伝熱	低融点金属及び化合物	緩やか	良好
光学FZ (OFZ)	ハロゲン及びキセノンランプ光の集光	導電性材料・酸化物・絶縁物	中程度	非常に良好
レーザーダイオードFZ (LDFZ)	半導体レーザー光の集光	高融点金属間化合物、非調和溶融材料	非常に急峻	非常に良好
電子ビームFZ (EBFZM)	電子ビームの直接照射	W, Mo, Ir 等 高融点純金属	最も急峻	超高真空のみ

メリット

- ルツボ不要で不純物汚染なし（無容器）
- 超高融点・反応性材料にも対応

課題

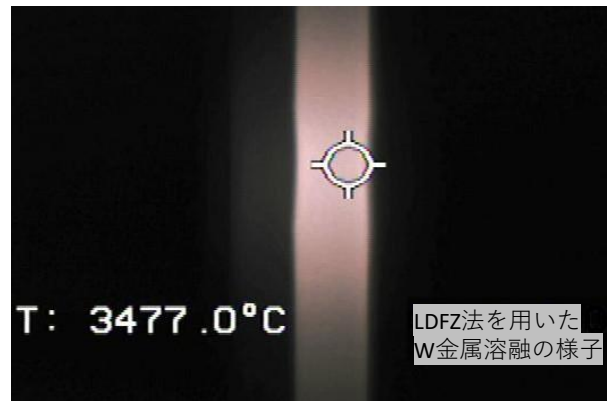
- 溶融帯が不安定になりやすい
- 非調和溶融化合物には、工夫が必要

代表的な応用材料

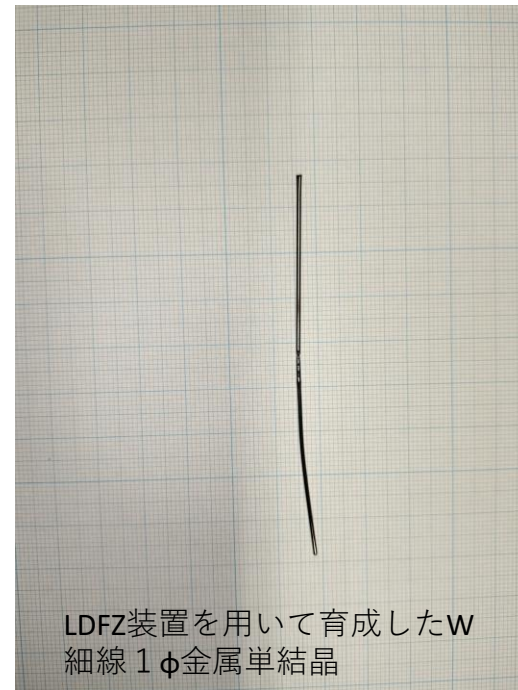
- 半導体：高純度Si単結晶 誘導加熱FZ
- 強相関電子系酸化物、光学FZ
- 非調和溶融化合物：YIG

事例①：LDFZ装置を用いた超高融点タングステン（W）の単結晶育成

最大出力400W×5台の半導体レーザーを搭載したLDFZ装置を用い、純金属最高峰の融点（約3422℃）を持つWの育成を行った。3477℃に達する超高温下において、レーザー集光による非常に急峻な温度勾配を活かして熔融帯を安定保持し、細線1φのW金属単結晶を得た。

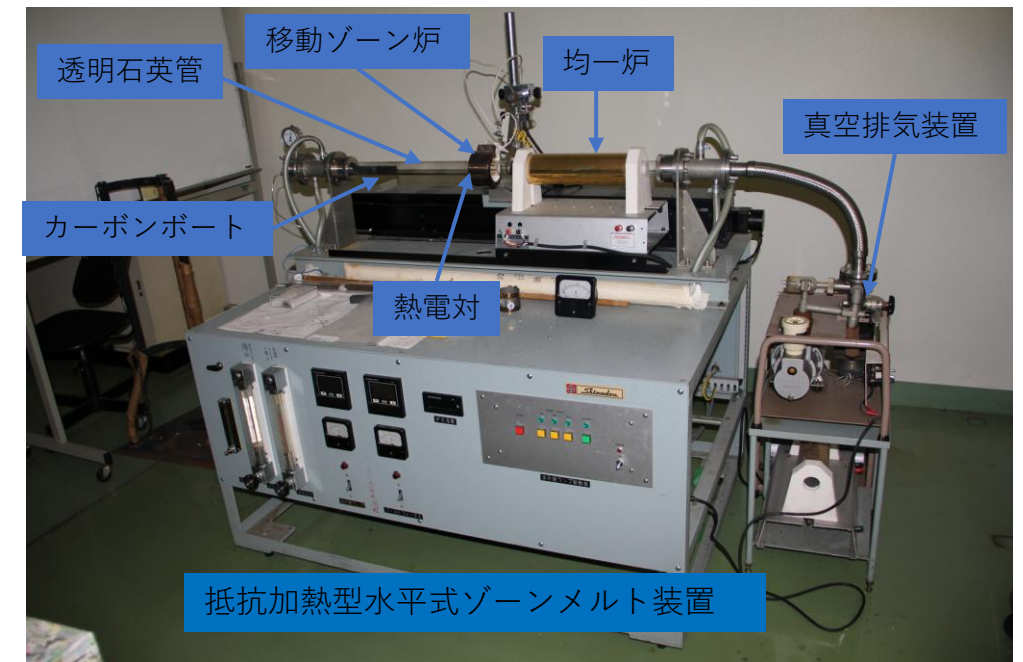


LDFZ装置
レーザーダイオード
最大出力400W×5台、波長976nm



事例②：抵抗加熱型水平式ゾーンメルト装置による結晶育成と物質精製

移動ゾーン炉、均一炉、透明石英管、真空排気装置、および熱電対等で構成される水平式の抵抗加熱装置である。カーボンボート上に原料を配置し、緩やかな温度勾配のもとで低融点化合物等の精密な結晶成長、およびゾーンリファインニング（偏析を利用した不純物排除・精製）に供される。



参考文献：ゾーンメルトによる物質精製の学生実験, 固体物理 32(5), 403-407(1997). 佐藤直記・小野孝文・田沼静一