

流体融合研究センターロードマップ成果報告

タイトル：マイクロソリッド混相流動循環

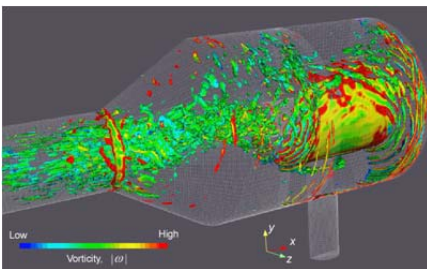
担当分野：実事象融合計算

1. 研究目的

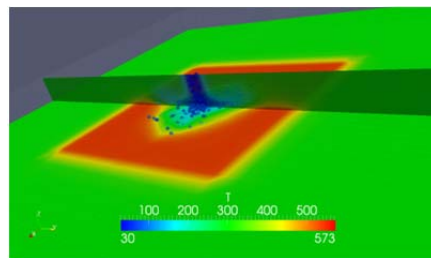
マイクロ・ナノオーダー粒径を有する微細固体窒素粒子（マイクロ・ナノソリッド）に代表される極低温高密度エネルギー媒体を，異分野融合型の技術領域に適用し，エネルギー循環の過程で新たに創出される低エミッション・低炭素・環境調和型システムを開発しグリーン・イノベーションに寄与することを目指している．本研究により最終的に実現を目指している低炭素循環型エネルギーシステムは，マイクロ・ナノソリッド混相流の究極的低エミッション・環境調和型循環サイクルである．すなわち，微細固体窒素粒子を 1) アッシングレス半導体洗浄，2) 次世代プロセッサ超高熱流束電子冷却，3) ヒト iPS 細胞のガラス凍結 の異分野領域に流動循環させて用いることにより無駄の少ないエネルギーシステムを開発することを目的としている．

2. 研究成果の内容

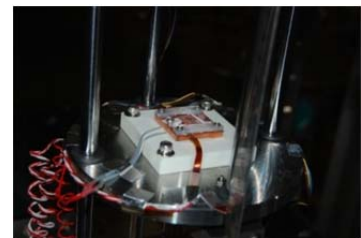
過冷却液体窒素と極低温ヘリウムガス（寒剤）の高速衝突により連続生成される微細固体窒素粒子から成るマイクロ・ナノソリッド噴霧流の有する超高熱流束冷却特性とそれに伴うレジスト熱収縮効果を有効活用した新型半導体洗浄法に関する検討を行った．その結果，マイクロソリッド噴霧は液体窒素噴霧と比較して，1.5 倍程度の限界冷却熱流束を得ることが可能であり， 10^4 W/m^2 オーダーの限界熱流束値を得た．また，マイクロ・ナノソリッドジェットの衝突による物理的レジストはく離と超高熱流束急冷による熱収縮の相乗効果を利用し，フォトレジストの一部をはく離することに成功した．加熱無しの場合，レジストはく離には至らないことから，レジストはく離に及ぼす熱収縮効果の影響はかなり大きいことを明らかにした．



超並列融合計算による固体窒素粒子噴霧形成に関するスーパーコンピューテーション



マイクロソリッド噴霧流による超高熱流束効果に関する超並列融合計算



マイクロスラッシュ噴霧流超高熱流束計測用センサー

3. 研究成果

① 学術雑誌（査読付き国際会議，解説等を含む）

- [1] Jun Ishimoto, Daisuke Tan, Hiroto Ohtake and Seiji Samukawa, Thermomechanical Resist Removal-Cleaning System Using Cryogenic Micro-Slush Jet, *Proceedings of The Symposium on Ultra Clean Processing of Semiconductor Surfaces (UCPSS)*, Ostend, Belgium, September 20-22 (2010) [in CD-ROM]

- [2] Jun Ishimoto, Numerical Study of Cryogenic Micro-Slush Particle Production Using a Two-Fluid Nozzle, *Cryogenics*, Vol. 49 (2009) pp. 39-50.
- [3] 石本淳, 二流体ノズルによるマイクロスラッシュ粒子生成の融合計算低温工学, Vol. 44, No. 2 (2009) pp. 68-76.
- [4] Jun Ishimoto, Development of Production System of Cryogenic Micro-slush Particles Using a Two-fluid Nozzle, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, Issue 10 (2008) pp.1235-1240.

② 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] 石本淳 (東北大), 丹 大輔 (東北大院), マイクロソリッドジェットによる超高熱流束冷却と新型半導体レジストはく離システムの開発, 第 88 期 日本機械学会流体工学部門 講演会, [2010 年 10 月 30 日 (土), 31 日 (日), 山形大学工学部 (米沢市)]
- [2] 石本淳 (東北大), 丹 大輔 (東北大院), マイクロスラッシュジェットを用いた超高熱流束冷却と新型半導体洗浄法の開発, 混相流学会年会講演会 2010 オーガナイズドセッション (OS-6 機能性流体のマルチスケール流動とシステム化). [2010 年 7 月 17 -19 日, 静岡大学 (浜松市)]
- [3] 石本淳 (東北大), 極低温マイクロ・ナノソリッドスプレー利用型半導体洗浄システムの開発, SEMICON 2010, 次世代技術パビリオンの出展社によるプレゼンテーション [2010 年 12 月 1 日, 幕張メッセ 国際展示場・国際会議場 (千葉市)]

③ その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

【特許】

- [1] 名称: 極低温マイクロスラッシュ超高熱流束冷却システム (出願中)
発明者: 石本淳, 番号: 特願 2008-154898, 出願年月日: 2008 年 6 月 13 日
- [2] 名称: マイクロ・ナノスラッシュ利用型半導体洗浄システム (出願中)
発明者: 石本淳, 番号: 特願 2010-011195, 出願年月日: 2010 年 1 月 21 日

【受賞】

受賞者名: Jun Ishimoto

受賞名: **Cryogenics Best Paper Award 2009 (Elsevier B.V.) (日本人では初)**

受賞論文: Jun Ishimoto, Numerical study of cryogenic micro-slush particle production using a two-fluid nozzle, *Cryogenics* (Elsevier B.V.), Volume 49, Issue 1, January 2009, pages 39-50.

受賞年月日: 2010 年 7 月 22 日, ICEC 23- ICMC 2010 (第 23 回国際低温工学-2010 国際低温材料会議, ブロツワフ工科大学, ポーランド)

【マスコミ発表】

- [1] 粒径 0.1mm 以下の固体窒素粒子 連続生成技術を開発 (日刊工業新聞 2007 年 7 月 17 日掲載)
- [2] 効率的な冷却システム実現 微細窒素粒子を生成 (河北新報 2007 年 6 月 20 日掲載)
- [3] ヘリウムでつくる粉雪 東北大、微粒子状窒素連続発生 (ガスレビュー 2007 年 11 月 15 日号掲載)



<http://www.elsevier.com>

PHYSICS

Cryogenics Best Paper Award



Congratulations to **Jun Ishimoto** on achieving the Cryogenics Best Paper Award 2009 for his paper ***Numerical study of cryogenic micro-slush particle production using a two-fluid nozzle.***

Published in Cryogenics (Volume 49, Issue 1, January 2009, pages 39-50) the winning paper was selected by the journal's Editorial Board. Jun Ishimoto will receive \$500, a certificate and a one year free subscription to the journal. The presentation will be

made at the International Cryogenics Engineering Conference 23- International Cryogenic Materials Conference 2010, in Poland, on July 22.

SUBJECT AREAS WITHIN:

Physics

- Condensed Matter Physics
- Instrumentation
- Interdisciplinary Physics
- Nonlinear, Statistical and Applied Physics
- Nuclear and High Energy Physics
- Optics with Atomic, Molecular and Plasma Physics
- Physics (General)
- Surfaces and Interfaces

河北新報

河北新報社

仙台市青葉区五橋1-2-28
(郵便番号 980-8660)

「東」は、未来



効率的な冷却システム実現

微細窒素粒子を生成

超電導 ケーブル 次世代型開発に弾み

東北大・石本准教授

東北大流体力学研究所の石本淳・准教授(混相流工学)は、高温超電導ケーブルの冷却に用いる微細な固体窒素粒子の生成技術を開発した。効率的な冷却システムを実現できることから、電力の需要増などに対応する次世代型ケーブルの実用化に弾みがつきそうだ。

高温超電導ケーブルは、熱の発生で超電導状態が崩れるため、零下一九六度前後に保たなくてはならない。

冷却法としては、ケーブルを包む断熱管内で液体窒素を循環させる方式があるが、冷媒の流入部から離れた個所では温度

が上昇しやすい。冷却効果を維持するには液体窒素の貯蔵タンクなど大規模な設備を要し、コスト高が難点となっている。

液体窒素に固体窒素粒子を混合したシャーベット状の「スラッシュ窒素」は比熱が大きく、安定した冷却性能が特徴。液体

窒素に代わる冷媒として注目されているが、従来の技術では一ミリの程度のふぞろいな形状の粒子しか作れず、断熱管内で凝集沈殿しやすいという課題があった。

石本准教授は、一部を断熱構造にした二流体ノズルを開発。過冷却した液体窒素と極低温のヘリウムガスを内部で衝突さ

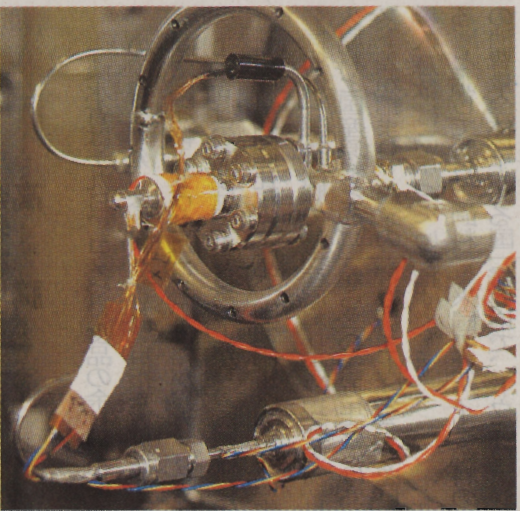
せたところ、〇・一ミリ以下の均一な球状窒素粒子が生成できた。

微細なスラッシュ窒素は冷却効果が高く、冷却システムの小型化と冷媒の削減が可能。管内の温度を一定に保てることから、ケーブルの耐久性も向上するという。

石本准教授は「燃料電池や冷媒に応用できるスラッシュ水素の生成にも転用できる」と話す。研究成果は、二十二日から札幌市で開かれる日本混相流学会で発表する。

② 高温超電導ケーブル 液体窒素温度 (零下196度)で、超

電導状態になる高温超電導線材を導体を使用したケーブル。既存の銅線ケーブルに比べ、送電容量は100倍近い。送電ロスを大幅に抑え、コンパクトに大電力を送ることができ。米国を中心に開発が進み、数百回の規模で実証試験が行われている。



石本東北大准教授が開発した固体窒素粒子を生成する二流体ノズル

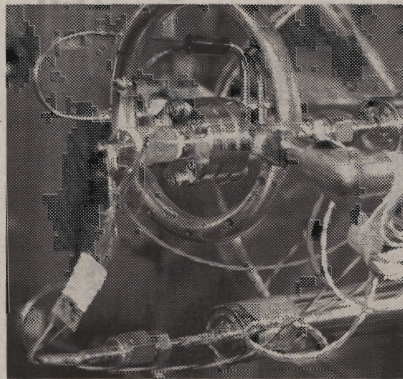


大 東北 粒径0.1μm以下の固体窒素粒子 連続生成技術を開発

【仙台】東北大学流体科学研究所の石本淳准教授は、粒径0.1μm以下の固体窒素粒子を生成する技術を開発した。液体窒素に低温ヘリウムガスを衝突させる方法で、均一な形状の固体窒素粒子を連続で生成できる。同技術は高温超電導ケーブルの冷却システムへの応

用を目的に開発。従来よりも低コストで効率的な冷却が可能となることから、高温超電導ケーブルの実用化が期待できる。同技術は「二流体ノズル方式」という。噴射管（ノズル）の中に約210度C付近まで冷却した液体窒素を注入。そこへ約267度Cの極低温

ヘリウムガスを高圧・高速で注入すると、噴射口から固体窒素粒子が噴出する仕組み。開発にはスーパーコンピュータを利用。仮想実験で固体窒素粒子の噴霧流動数値を予測してノズルの設計を行った。従来、固体窒素粒子を生成する方法には、かき

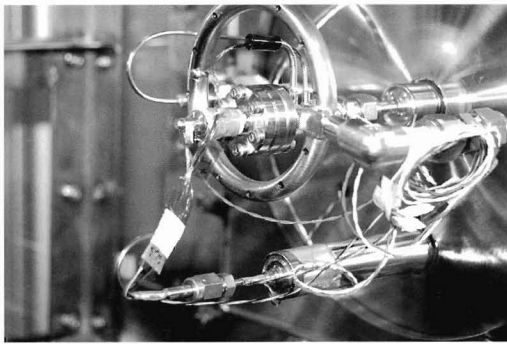


固体窒素粒子生成システムのノズル

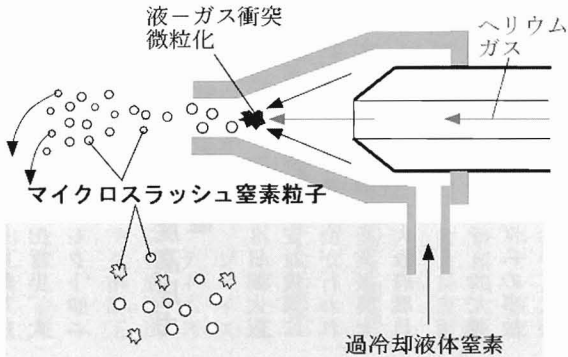
氷のように固体窒素を砕いて生成する方法があった。しかし、この方法で生成する窒素粒子の粒径は1μm程度で、0.1μm

以下の粒径は実現できなかった。固体窒素粒子は高温超電導ケーブルの冷却剤に利用される。約197度C付近で電気抵抗が0にな

る方法が用いられている。さらに効果的な冷却を行うため、氷水のように液体窒素中に固体窒素粒子を混入させた冷却剤を循環させるシステムが検討されている。石本准教授は「今回の研究で開発した二流体ノズル方式は水素粒子の生成に応用が可能。冷却剤はコンピュータなど各種の冷却装置に応用できる」としている。今後、大手電線メーカーなどと共同で実用化に向けた研究を進める予定。



微粒子状の固体窒素を噴き出すノズル（上）と概念図（下）



東北大、微粒子状固体窒素の連続生成装置を開発

ヘリウムでつくる窒素の粉雪

東北大学流体科学研究所の石本淳准教授は、過冷却状態の液体窒素にヘリウムガスを衝突させることで、0.1mm以下の微粒子状の固体窒素を連続生成することに成功した。アメリカなどで実用化の進められている、高温超電導ケーブルの冷却システムへの応用が期待されている。

素を連続生成する装置。粒径が0.1mm以下の粉雪のような微粒子状の固体窒素を均一に生成することができる。二流体ノズルと呼ばれる噴出口が凍りつくのを防ぐために先端が断熱構造となっており、MEMSに近い微細な技術が使われている。装置の設計には同研究所のスーパーコンピュータが用いられた。2時間の実験で液体窒素の使用量は約20リットル、液体ヘリウムは約20リットルである。

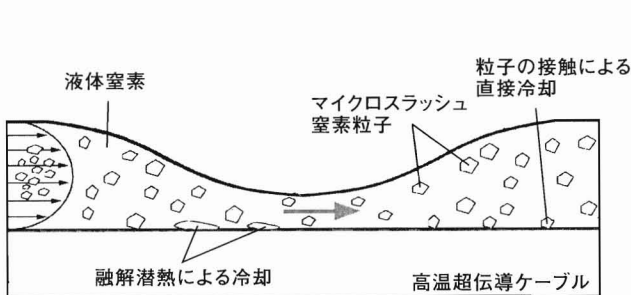


石本淳東北大学准教授

生成した微粒子状固体窒素と液体窒素を、氷水のように混ぜて「固液2相冷媒」として使用することで、液体窒素のみの場合よりも高い冷却効果を発揮する。固体窒素の融解潜熱は液体窒素の比熱の約13倍となるため熱容量が大きい。そのため固体窒素と液体窒素を質量比で1対1の割合で混合すると、液体窒素のみの場合と比べて密度が16%、冷却能が約22%上昇する。冷媒を実際に流動させて使用すると、強制対流熱伝達の効果によって冷却効果が2〜3倍に向上するとされる。

超電導ケーブルの冷却システムに応用可能

従来の「フリーズソー法」と呼ばれるスラッシュ窒素の生成技術では、かき水をつくるように固体窒素からスラッシュ窒素を生成していたため、ミリレベルの大きさの粒径のスラッシュ窒素しかつくることができなかった。粒径



超電導ケーブルの冷媒としての応用例

がミリ単位のスラッシュ窒素は液体窒素よりも密度が高いため、超電導ケーブル内で沈殿してしまい、環流する冷媒として使用することができなかった。マイクロスラッシュ窒素を利用することで、冷媒の能力を高め超電導ケーブルの効率的な冷却システムの実現が見込まれている。

石本准教授は「マイクロスラッシュ技術は水素や半導体のレジスト工程にも応用することが可能です。また次世代CPUの冷媒としての利用も考えられる」と語る。今後は、液体窒素とヘリウムの最適な衝突条件などの研究を進めたいとしている。



産業用ガスの形が見えますか
鈴木商館はガスの形を提案します。

株式会社 **鈴木商館**

〒174-8567 東京都板橋区舟渡1-12-11
電話 03(5970)5555(代表) FAX 03(5970)5560
ホームページ: <http://www.suzukishokan.co.jp>
E-mail: suzusho@suzukishokan.co.jp