

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360082

研究課題名(和文) マイクロスラッシュ利用型超高熱流束混相電子冷却システムの開発

研究課題名(英文) Development of multiphase ultra-high heat flux electronic cooling system using micro-slush

研究代表者

石本 淳 (ISHIMOTO JUN)

東北大学・流体科学研究所・准教授

研究者番号：10282005

研究成果の概要(和文)：従来型電子冷却システムの限界を打破するため、本研究では、超高熱流束冷却が可能な高機能性冷媒としてマイクロスラッシュ二相流利用型超高熱流束電子冷却システムを提案する。マイクロスラッシュ噴霧の有する超高熱流束効果に関し、PIA 粒子計測・非定常冷却熱流束のデータベース化と CFD 計算条件 取り込みによる融合計算を用いた総合的アプローチを行った。その結果、マイクロスラッシュ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、新型電子冷却法開発の基盤となる成果を得た。

研究成果の概要(英文)：The fundamental characteristics of the heat transfer and cooling performance of the micro-solid nitrogen particle spray impinging to the heated plate was numerically investigated and experimentally measured by a new type of integrated computational-experimental technique.

The used Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis based on Euler-Lagrange model is focused on the cryogenic spray behavior of atomized micro-solid nitrogen and on the ultra-high heat flux characteristics of the micro-solid particle.

Based on the numerically predicted performance, a new type of cryogenic spray cooling technique which can be available to apply the ultra-high heat power density device is developed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	10,700,000	3,210,000	13,910,000
2009 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
総計	15,400,000	4,620,000	20,020,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：混相流, スラッシュ, 熱伝達, 微粒化, 冷媒, 極低温, 凝固

1. 研究開始当初の背景

次世代の半導体部品やコンピュータチップに発生する局所熱流束は 10^6 W/m^2 を越え、総パワーは 300W に達し、原子炉炉心の発熱密度をも超えようとしている。このレベルで発生した熱を効果的に管理することが可能な冷却装置は現在のところ存在しない。今後

は半導体の設計ルールが微細化するので CPU が低消費電力化すると期待されているが、一方、発熱密度は従来よりも高くなるため近い将来には核融合炉並の発熱密度に至るとさえ予測されている。

特に次世代高性能 CPU は従来の CPU に比べて消費電力が高く、 10^5 W/m^2 レベルの放熱性

能を有しなければ所定の性能を発揮出来ず、現在の液冷法ならびに強制対流沸騰熱伝達を用いてももはや追従できないレベルにまで達するものと予測される。このような理由から、システムの高速度化、高密度化及び高信頼性化を実現させるための最も重要となる新型プロセッサ冷却法の開発が望まれている。

さらに次世代のプロセッサは全体の発熱が大きだけでなく、発熱密度が不均一となり複数の「ホットスポット」がプロセッサ上に現れることが予想されている。

このホットスポットは特に演算量が多い場所であり、冷却システムで一定の温度以下に保つ必要があるが、従来のヒートシンク、ファンクーラー、ヒートパイプなど「passive (受動的)」に熱を吸収・発散する手法は大きな金属素材を必要とする上、効果的にホットスポットを冷却することができないという欠点を有している。

2. 研究の目的

本研究は、以上の困難を打破しうる 10^4-10^5 W/m^2 レベルの超高熱流束の冷却性能を有する新型混相電子冷却システムを開発することを主目的とする。

超高熱流束混相冷却を可能にする冷媒として新たに微小固体窒素粒子からなるマイクロスラッシュの高速噴霧流と、マイクロスラッシュ-液体窒素固液二相流を用いる。

マイクロスラッシュ利用型超高熱流束電子冷却システムはスラッシュの有する高い寒冷保有量（エンタルピー）と、超高速衝突噴霧流の活用により現時点で最高性能を有する冷却法である強制対流沸騰熱伝達における限界熱流束の数十倍のオーダーまで熱伝達特性を向上させることが可能、さらにはパッケージ接合部における接触熱抵抗の大幅な軽減化が可能である。

3. 研究の方法

断熱二流体ノズル内で極低温ヘリウムガスと過冷却液体窒素を高速で衝突混合、微細固体窒素噴霧を生成させ、マイクロスラッシュ噴霧の有する超高熱流束効果に関し、非定常熱流束の計測を行った。さらに、PIA 粒子計測・非定常冷却熱流束のデータベース化と CFD 計算条件 取り込みによる融合計算を用いた総合的アプローチを行った。断熱二流体ノズルから噴射されるマイクロスラッシュ噴霧の噴霧特性や粒子数、粒子径、粒子形状等の粒子特徴量、および粒子速度を解析するため、PIA-PIV coupled 粒子画像計測手法を導入する。

マイクロ SN_2 噴霧の噴霧熱流動特性に対し、融合型 CFD を用いた混相流体解析を行う。本

融合解析においては PIA、PIV による SN_2 粒子計測結果（ SN_2 流速・粒子径等）を一旦データベースに格納し、初期条件をデータベースから読み込むことにより CFD を実施している。基礎方程式のモデル化にあたっては、粒子相-周囲流体相間相互作用とエネルギー交換を考慮した Euler-Lagrange 熱非平衡二流体モデルに基づいた基礎方程式系を構成する。

4. 研究成果

マイクロスラッシュ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。限界熱流束に達するまでの時間に関しても、マイクロスラッシュ噴霧により液体窒素噴霧の 1/2 の時間まで短縮可能であることを明らかにした。

さらに、 LN_2 噴霧の場合、限界熱流束値を達成後に熱流束が徐々に減少しているが、 SN_2 噴霧は、粒子がミクロンオーダーであるため固相-気相への相変化に要する特性時間が非常に短く、膜沸騰状態を極力回避可能であるため限界熱流束値を達成後も冷却効果を持続可能であることが判明した。

また、数値解析においては、Euler-Lagrange 熱非平衡二流体モデルに基づいた基礎方程式系を構築し、計測結果簡易データベースを

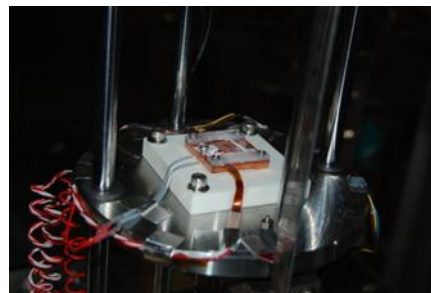


図 1 マイクロスラッシュ噴霧流超高熱流束計測用センサー

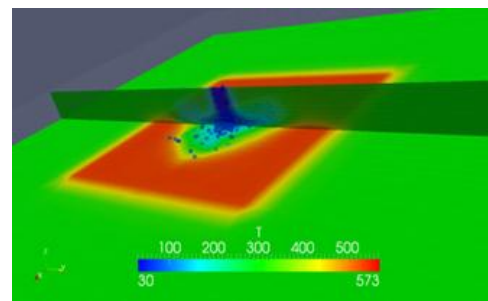


図 2 マイクロスラッシュ噴霧流による超高熱流束効果に関する超並列融合計算

連携させた計算条件取り込みによる CFD 融合計算を行い、マイクロスラッシュ噴霧流の熱流動特性とマイクロスラッシュ粒子の噴霧流動特性に関する融合型数値予測が可能となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

1. Jun ISHIMOTO, Fuminori Sato and Gaku Sato, Computational Prediction of the Effect of Micro-cavitation on an Atomization Mechanism in a Gasoline Injector Nozzle, *Trans. ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 132, Issue 8 (2010) 082801 doi:10.1115/1.4000264. (査読有)
2. Kazuo Matsuura, Masami Nakano and Jun Ishimoto, Forced ventilation for sensing-based risk mitigation of leaking hydrogen in a partially open space, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 35, Issue 10, May 2010, Pages 4776-4786. (査読有)
3. Jun Ishimoto, Numerical Study of Cryogenic Micro-Slush Particle Production Using a Two-Fluid Nozzle, *Cryogenics*, Vol. 49 (2009) pp. 39-50. (査読有) (**Cryogenics, Best Paper Award 2009, Elsevier B.V. 受賞**)
4. 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. (査読有)
5. 石本淳, 大平 勝秀, 岡林 一木, 千歳 敬子
液体水素ジェット微粒化プロセスに関する融合数値予測
低温工学, Vol. 44, No.7 (2009) pp. 314-322. (査読有)
6. Kazuo Matsuura, Masami Nakano, Jun Ishimoto, The Sensing-Based Adaptive Risk Mitigation of Leaking Hydrogen in a Partially Open Space, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, No. 20 (2009) pp. 8770-8782. (査読有)
7. 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. (査読有)

8. Jun Ishimoto, Katsuhide Ohira, Kazuki Okabayashi and Keiko Chitose, Integrated Numerical Prediction of Atomization Process of Liquid Hydrogen Jet, *Cryogenics*, Vol. 48 (2008) pp. 238-247. (査読有) (**Cryogenics, ScienceDirect TOP 25 Hottest Articles 18 位にランクイン**)
9. Katsuhide Ohira, Masakazu Nozawa, Jun Ishimoto, Noriyasu Koizummi and Takanobu Kamiya, Pressure Drop Reduction of Slush Nitrogen in Turbulent Pipe Flows, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 53 (2008) pp. 67-74. (査読有)
10. Katsuhide Ohira, Jun Ishimoto, Masakazu Nozawa, Toshio Kura and Norifumi Takahashi, Heat Transfer Characteristics of Slush Nitrogen in Turbulent Pipe Flows, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 53 (2008) pp. 1141-1148. (査読有)
11. Jun Ishimoto, Takashi Kudo and Kozo Saito, The Effect of Magnetic Field on a Microgravity Single Droplet Combustion, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 6 (2008) pp.635-640. (査読有)

[学会発表] (計 18 件)

1. 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)]
2. Jun ISHIMOTO and Kozo Saito
The Effect of Micro-Cavitation on
Interfacial Phenomena and Vortex Structure
of Atomizing Flow in Gasoline Injector
Nozzle
*Proceedings of the 10th International
Symposium on Advanced Fluid Information
and Transdisciplinary Fluid Integration,
AFI/TFI-2010*, Nov. 1-3 (2010).
3. Kazuo Matsuura, Masami Nakano and Jun ISHIMOTO,
Sensing-Based Smart Ventilation Control of
Leakage Hydrogen Jet in a Partially Open
Space.
*7th International Conference on Flow
Dynamics, ICFD2010*, Nov. 1-3 (2010).
4. 石本淳 (東北大), 丹 大輔 (東大院)
マイクロソリッドジェットによる超高温
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)]
5. 松浦 一雄 (東北大国際高等), 中野 政
身 (東北大流体研), 石本 淳
水素噴流漏洩を伴う部分開放空間にお
けるセンシングに基づくリスク緩和制
御
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)]
 6. Jun Ishimoto, Shinji Akiba, Kazuhiro Tanji,
Kazuo Matsuura
Integrated Super Computational Prediction
of Liquid Droplet Impingement Erosion
*The Joint International Conference of the
7th Supercomputing in Nuclear Application
and the 3rd Monte Carlo (SNA + MC2010)*,
Tokyo, Japan, Oct. 17-21 (2010).
 7. Jun Ishimoto, Daisuke Tan, Hiroto Ohtake
and Seiji Samukawa, Thermomechanical
Resist Removal-Cleaning System Using
Cryogenic Micro-Slush Jet, *The
Symposium on Ultra Clean Processing of
Semiconductor Surfaces (UCPSS)*, Ostend,
Belgium, September 20-22 (2010)
 8. Kazuo Matsuura, Masami Nakano and Jun
Ishimoto,
The sensing-based high-fidelity risk
mitigation control of hydrogen dispersion in
a partially open space,
*The ICCE-2010, 10th international
conference on clean energy*, 15-17
September 2010, Famagusta, North Cyprus.
 9. JUN ISHIMOTO
Integrated super computational analysis of
atomization process of magnetic fluid jet
*The 12th International conference on
Magnetic Fluids*, Sendai, Japan, August 1 –
5 (2010).
 10. 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)]
 11. Jun ISHIMOTO, Fuminori Sato and Gaku
Sato
Integrated Computation of Primary
Atomization with Micro-Cavitation in
Injector Nozzle
*6th International Conference on Flow
Dynamics, ICFD2009*, Nov. 4-6 (2009).
 12. 石本淳 (東北大),
異分野融合による極低温マイクロスラ
ッシュジェットの先端高機能化
日本混相流学会年会講演会 2009 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).
[2009 年 8 月 7 -9 日, 熊本大学 (熊本
市)]
 13. 石本淳 (東北大), 丹 大輔 (東北大院),
鈴木俊裕 (航空大学校), 大平勝秀 (東
北大)
液体水素ピンホールジェットの乱流微
粒化プロセスに関する並列融合数値予
測
日本混相流学会年会講演会 2009 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).
[2009 年 8 月 7 -9 日, 熊本大学 (熊本
市)]
 14. Jun Ishimoto,
Integrated Computation of Micro-Cavitation
in Gasoline Injector Atomization
*11th ICLASS International Conference on
Liquid Atomization and Spray Systems*, Vail,
Colorado, USA, Sunday, July 26 Thursday,
July 30, 2009.
 15. Jun Ishimoto, Daisuke Tan, Toshihiro
Suzuki, and Katsuhide Ohira,
Integrated Parallel Computation of
Atomization Process of Liquid Hydrogen
Jet.,
AFI/TFI-2008, December 19-20, 2008,
Sendai, Miyagi, JAPAN.
 16. Jun Ishimoto, Fuminori Sato and Gaku Sato
and Kozo Saito,
Integrated Parallel Computation of Spray
Atomization with the Effect of
Micro-Cavitation, *2008 Painting
Technology Workshop (PTW2008)*, Oct. 6-7
(2008) Lexington, KY, USA.
 17. 石本淳,
極低温マイクロスラッシュの二流体微
粒化噴霧熱流動に関する融合計算
第 27 回 混相流学会年会講演会 2008
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). [2008 年 8 月 8(金)- 10 日(日),
会津大学 (会津若松市)]
 18. 石本 淳, 佐藤史教, 佐藤 岳 ((株) ケ
ービン)
マイクロキャビテーションを伴うイン
ジェクター微粒化機構の融合可視化
第 36 回可視化情報シンポジウム, 2008
年 7 月 23 日, 工学院大学 (東京都新宿
区).

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

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

発明者：石本淳

権利者：同上

種類：

番号：特願 2008-154898

出願年月日：2008 年 6 月 13 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://alba.ifs.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石本 淳 (ISHIMOTO JUN)

東北大学・流体科学研究所・准教授

研究者番号：10282005

(3) 連携研究者

大平 勝秀 (OHIRA KATSUhide)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：30375117