

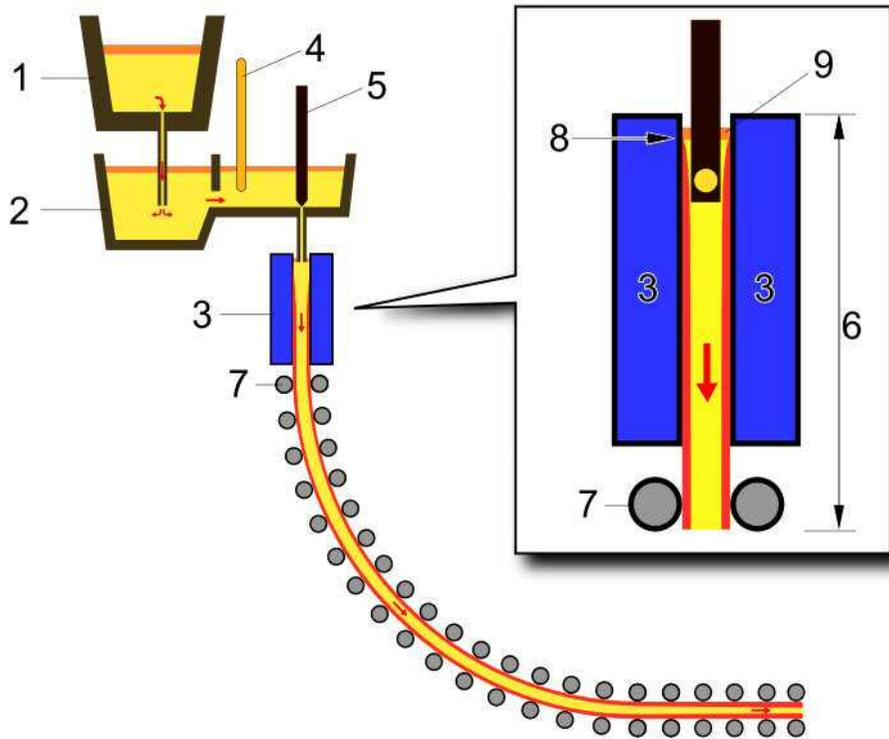
オンオフ切替式コイルを適用した 気泡・介在物除去技術

九州工業大学 大学院情報工学研究院
物理情報工学研究系
准教授 河野 晴彦

令和2年12月10日

連続鑄造の概要

1.取鍋 2.タンデッシュ 3.鑄型



- 連続鑄造とは、製鉄所での主要な工程の一つで、溶けた鉄が固まる過程で一定の形の鋼片を作ることである。
- 鉄鋼メーカーは**生産性**と**品質レベル**の向上にしのぎを削っているが、一般的にこの二つはトレードオフの関係にあり、これらを同時に達成させる溶鋼の管理技術は困難とされる。

研究対象：**鑄型に着目**

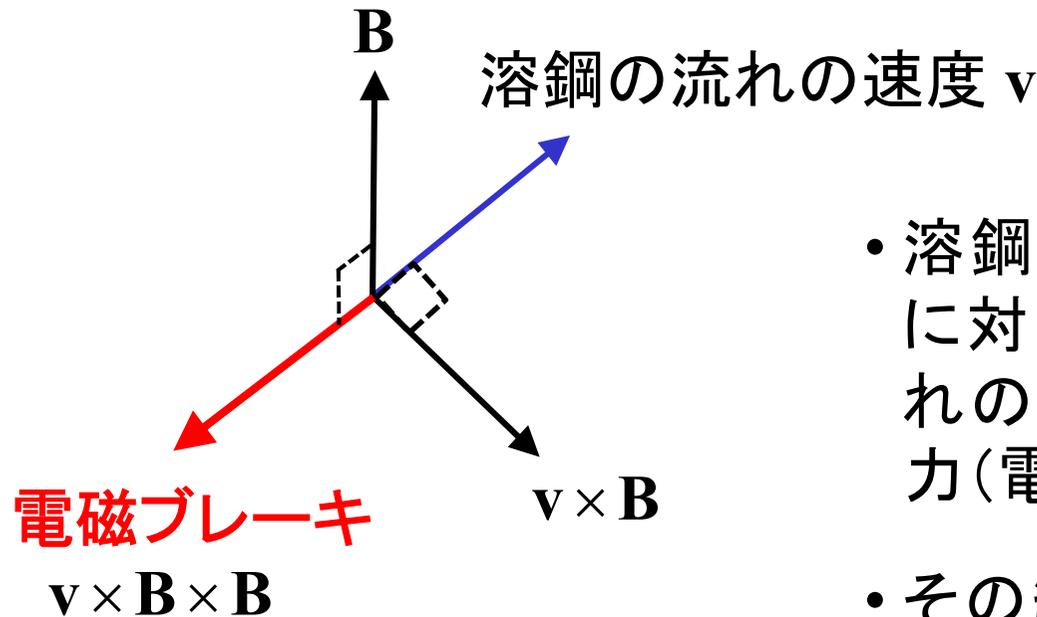
- タンディッシュの底部から注がれる溶鋼は精密に調整されながら冷やされる。
- 高品質な製品を生産するためには、溶鋼の**流れの制御**や、溶鋼に取り込まれる**介在物や気泡の除去**が必要である。

Attribution: Tosaka
([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Continuous_casting_\(Tundish_and_Mold\)-1_NT.PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Continuous_casting_(Tundish_and_Mold)-1_NT.PNG))

溶鋼の流動制御：電磁ブレーキ

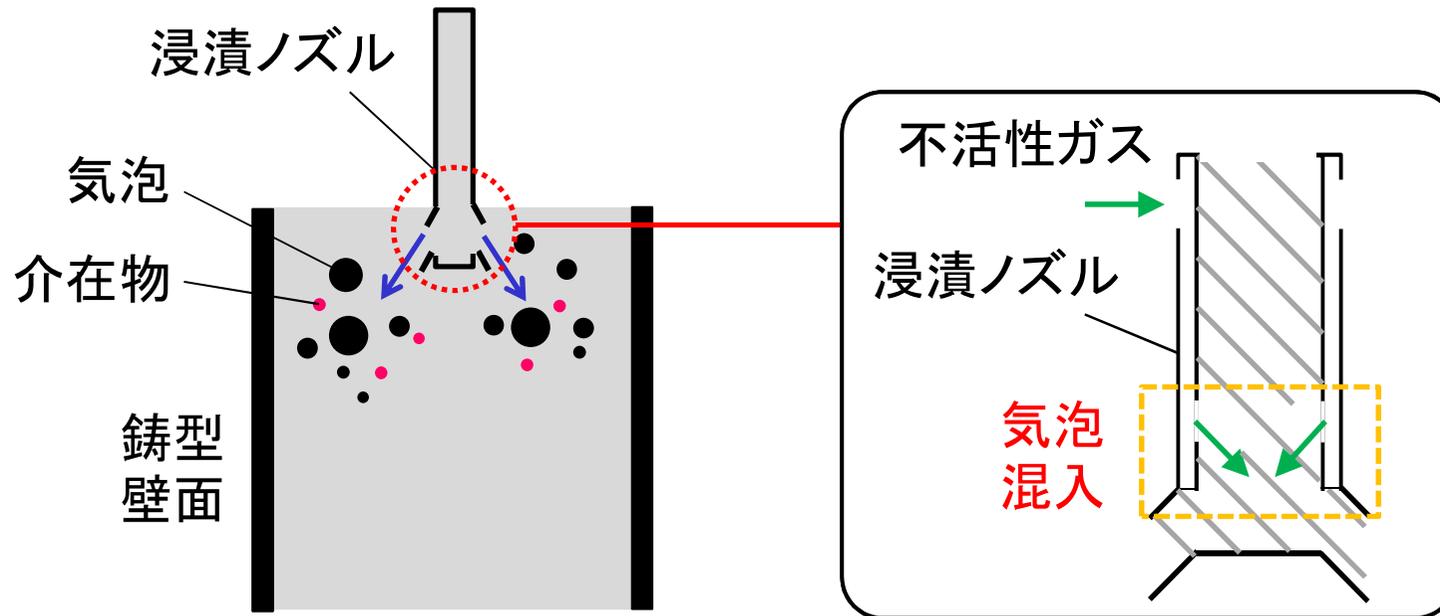
非圧縮性流体に適用される運動方程式

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{Ha^2}{Re} \underbrace{\mathbf{J} \times \mathbf{B}}_{= \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}}$$



- 溶鋼の流れの方向が磁場の方向に対してほぼ垂直である場合、流れの方向とは逆向きにローレンツ力(電磁ブレーキ)が発生する。
- その結果、溶鋼の流れ、および溶鋼中に混入される**気泡や介在物の運動が抑制**される。

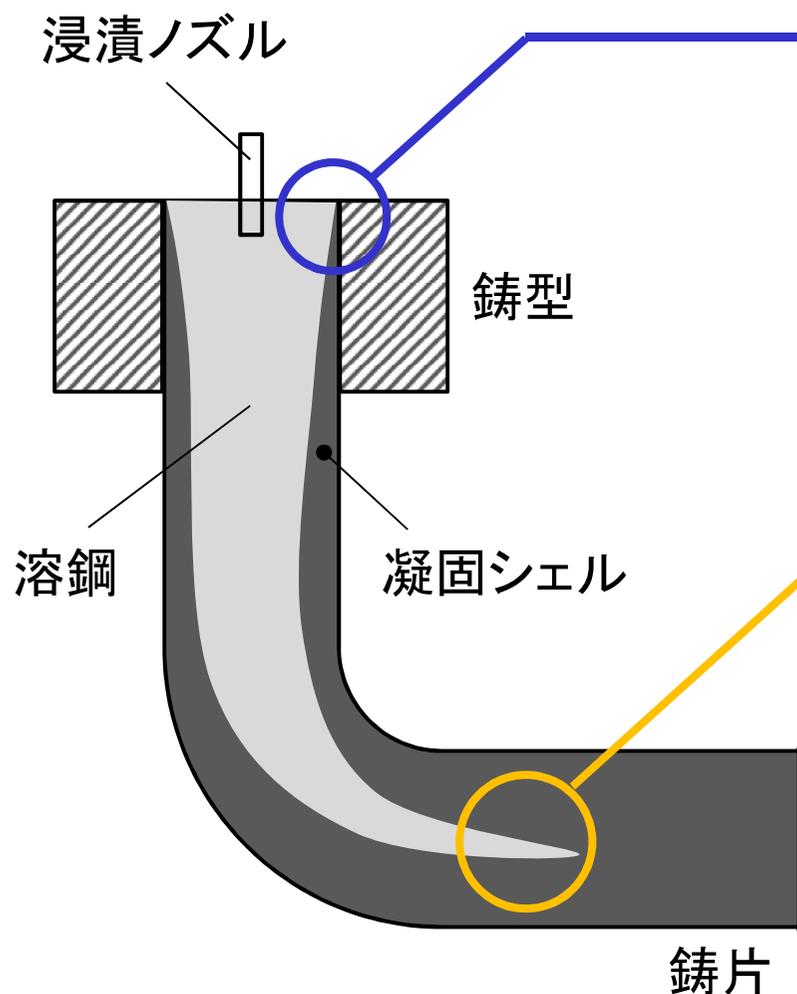
溶鋼中に混入される気泡や介在物



- 浸漬ノズル先端からアルゴンガス(不活性ガス)を注入することにより、ノズル部で溶鋼が凝固したり、非金属性介在物が蓄積したりすることを防ぐ。
- その結果として溶鋼中に混入される気泡や介在物は、鑄型内で浮上させて除去される必要がある。これらの未放出による欠陥は各種使用部材の寿命に大きく影響を及ぼす。

気泡や介在物はどこで捕捉されるのか？

気泡や介在物が捕捉される場所



湯面近傍の初期凝固シェル

⇒ 表面欠陥の原因

〔電磁攪拌によって溶鋼の流れを生じさせ、気泡や介在物の初期凝固シェルへの付着を抑制する方法が広く適用されている。〕

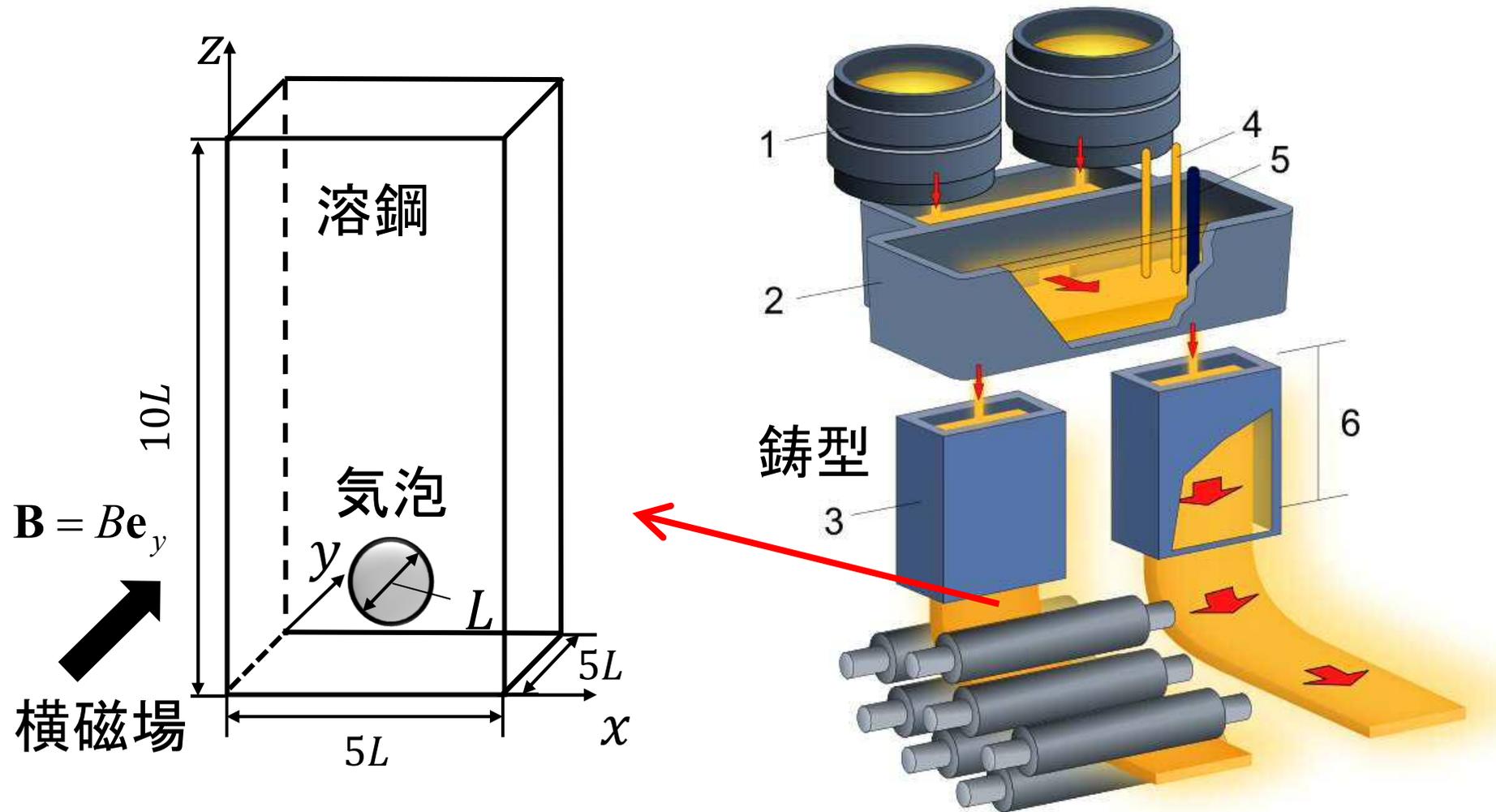
湾曲部を経た水平な凝固シェル

⇒ 内部欠陥の原因

〔残存気泡等が浮上して上面側の凝固シェルに捕捉される。ここまで気泡や介在物が入り込んでしまったら逃げ場がないため、捕捉を回避する有効な方法はない。〕

本発明は、鑄型の下溶鋼内に残存する気泡や介在物の量を減らし、内部欠陥の低減を実現するものである。

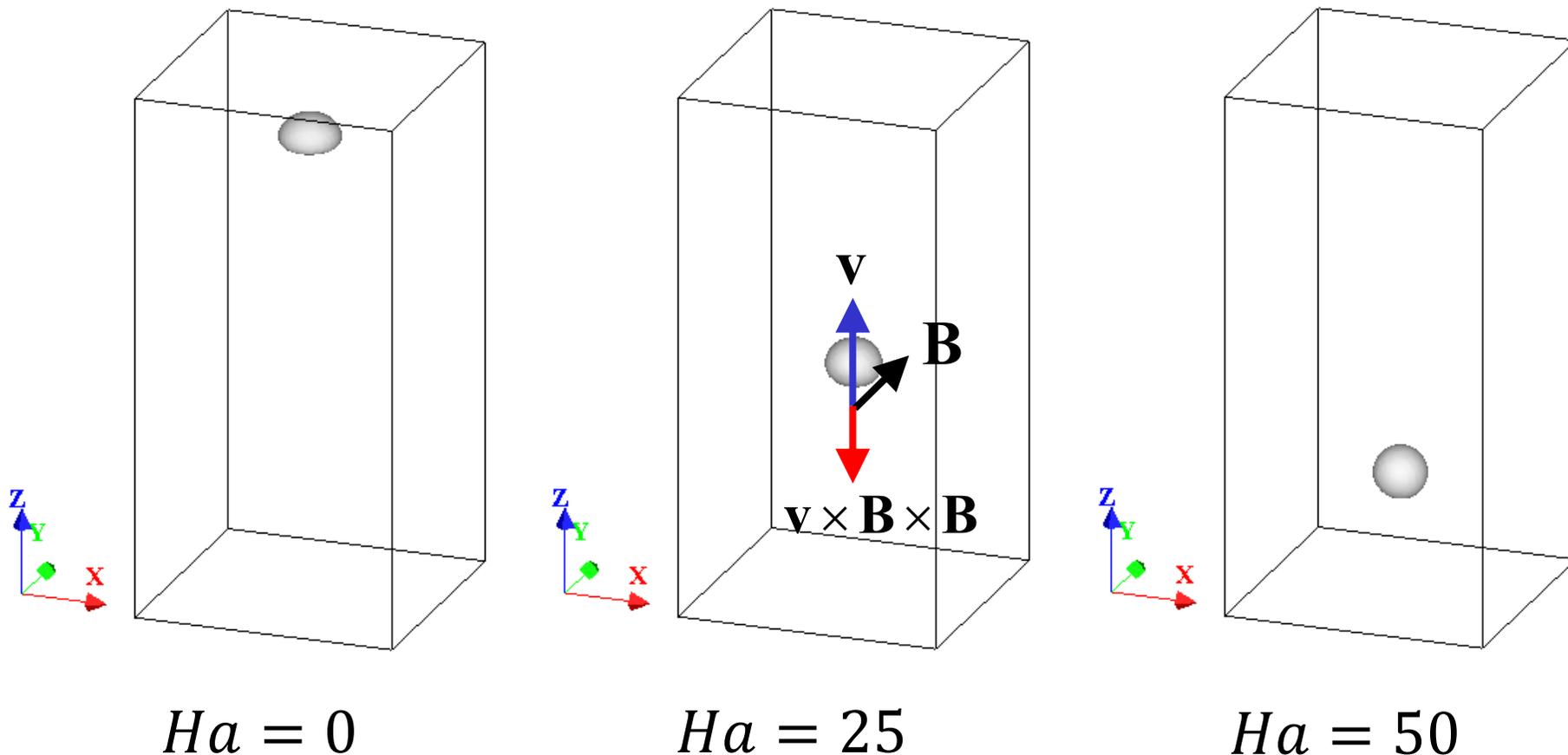
解析モデル(気泡を含む緩やかな流れ解析)



流れが比較的緩やかな溶鋼内に残存する単一気泡の運動の解析モデル。計算領域の境界における溶鋼の流入・流出は考慮していない。

Attribution: Tosaka
([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Continuous_casting_\(Tundish_and_Mold\)-2_NT.PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Continuous_casting_(Tundish_and_Mold)-2_NT.PNG))

同一時刻における気泡の位置の比較



浮力による上昇 vs. 上昇する溶鋼にはたらく電磁ブレーキ

Ha の増加とともに強まる。さらに、表面張力により気泡は球形に近づく。

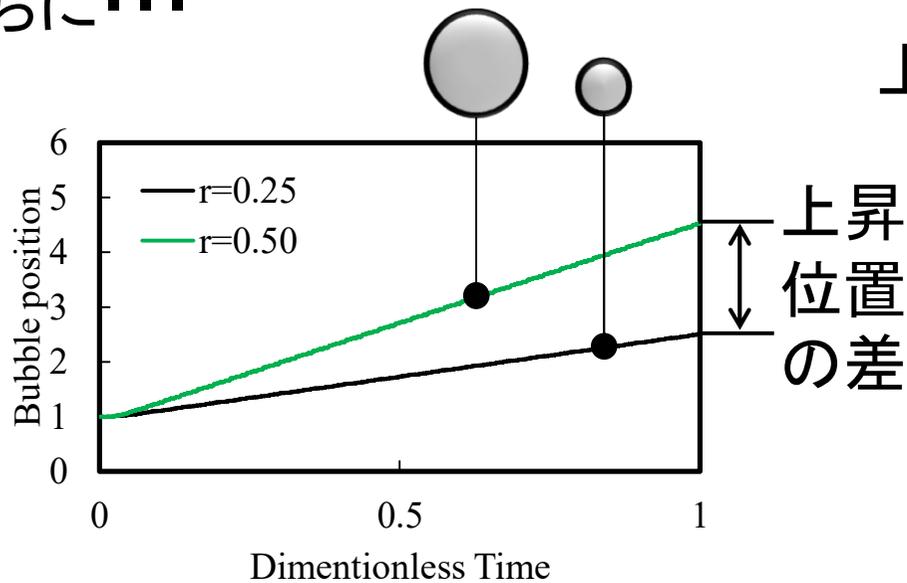
$$\frac{Ha^2}{Re} \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

→ 上方へ向かう駆動力が弱まり、
気泡の上昇がさらに抑制される。

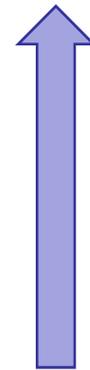
電磁ブレーキによる残存気泡の上昇の抑制

- 気泡や介在物が凝固シェルに捕捉されないように、溶鋼に電磁ブレーキを作用させてその流れを適切に制御する方法が一般的に使われている。一方、**鑄型下部においては、電磁ブレーキの作用により気泡や介在物の上昇が抑制される可能性がある。**

- さらに・・・



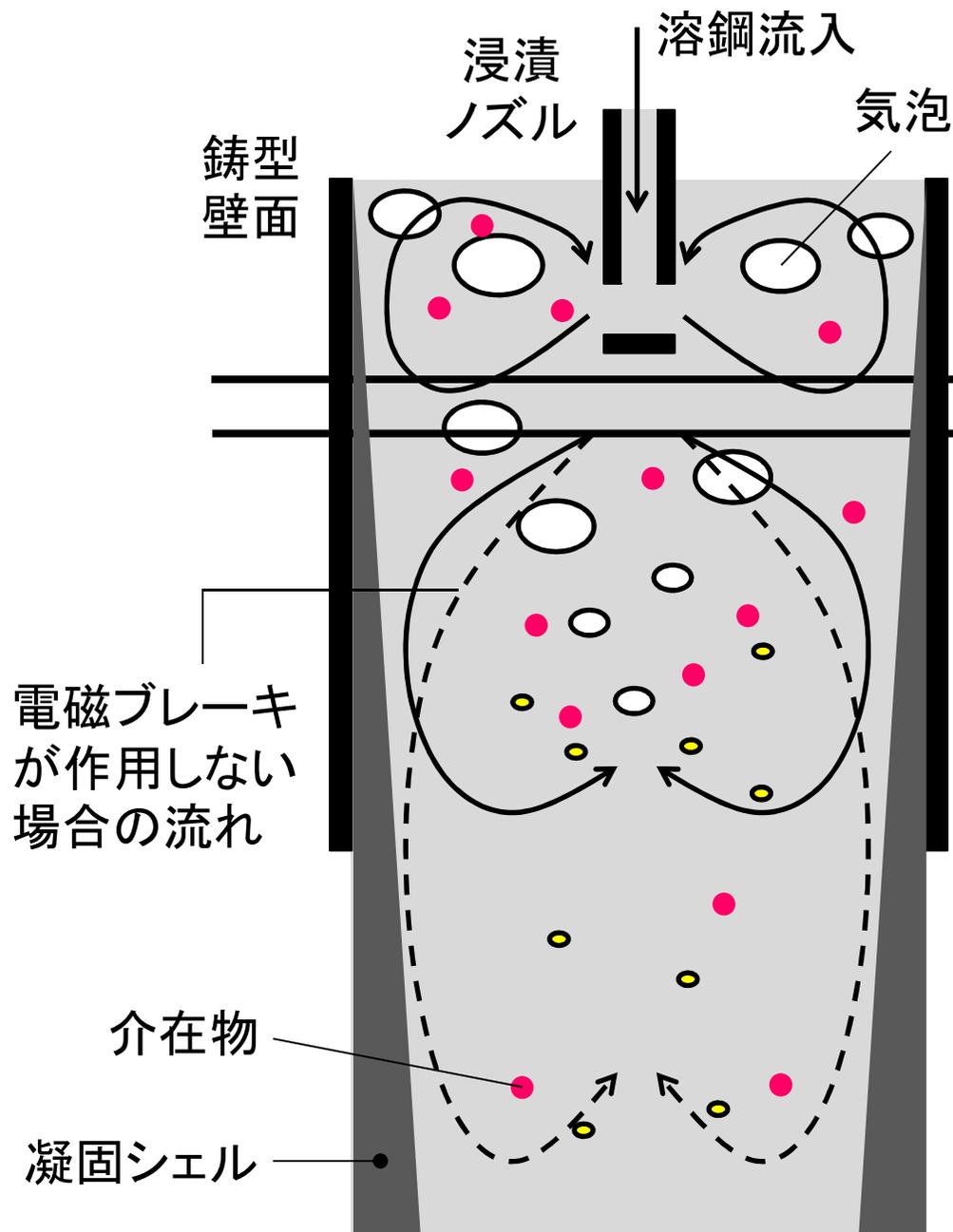
上昇方向



一様磁場の下でも、気泡径が大きいほど強い浮力が働くために上昇速度は大きい。

すなわち、**微細な気泡や介在物**は溶鋼内に長く留まる可能性があり、**それらが内部欠陥の原因となりうる。**

従来技術とその問題点



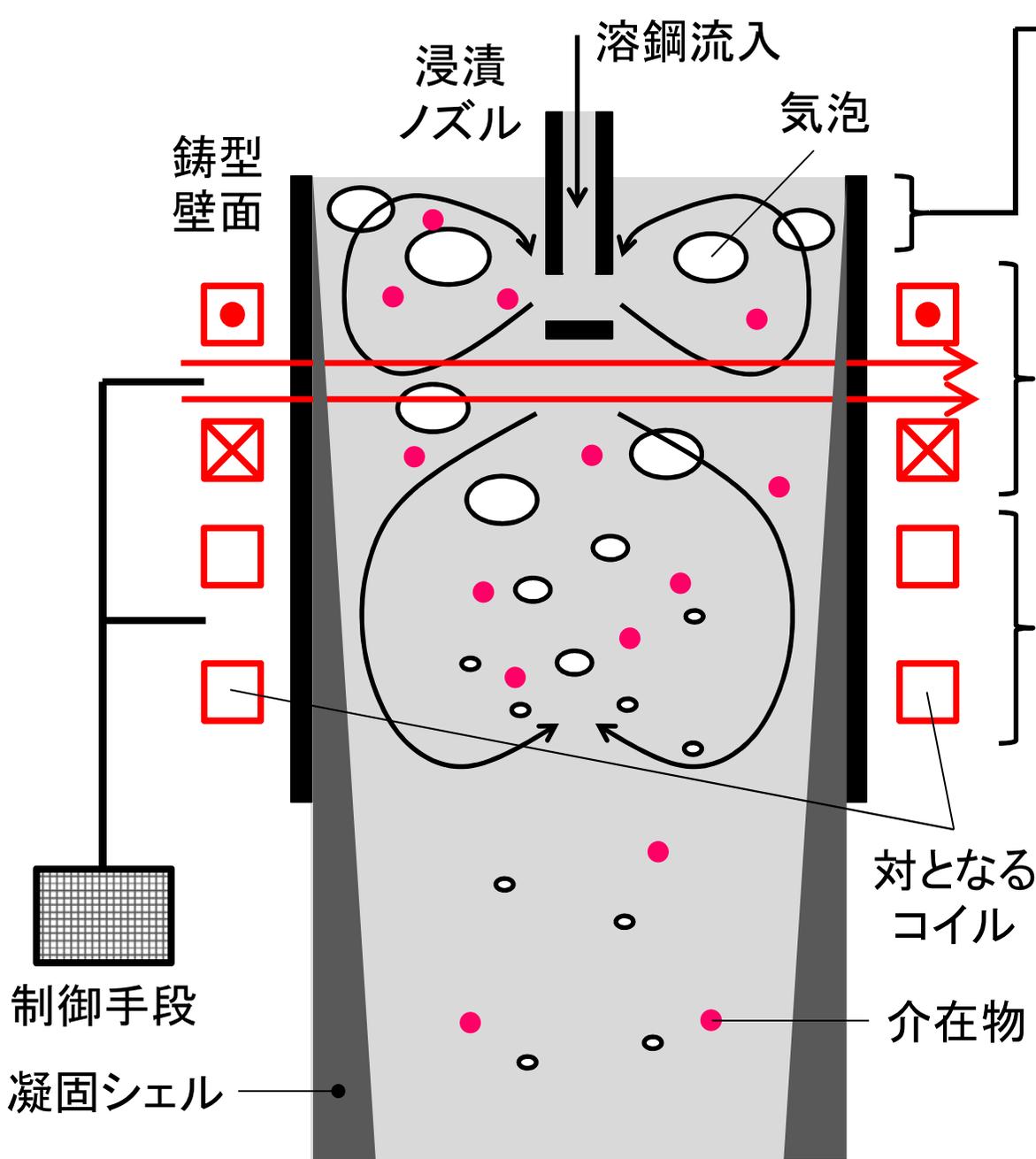
直流磁場による電磁ブレーキ

浸漬ノズルからの(気泡や介在物を含む)吐出流が鑄型の奥深くに入り込むことによって生じる内部欠陥を抑えることができる。

しかし、鑄型の下に溶鋼内に存在する微細な気泡や介在物が上昇すると、ある位置において電磁ブレーキの作用により減速し、それらが上方からの吐出流により下方へ運ばれて内部欠陥の原因となりうる。

電磁ブレーキを維持しつつ、この問題を改善できないか？

オンオフ切替式コイルの提案



従来の技術を適用

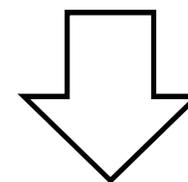
具体的には、移動磁界による攪拌で表面欠陥を抑制したり、電磁ブレーキにより湯面の変動や流れを制御したりする。

【電磁ブレーキ「オン」領域】

気泡や介在物が電磁ブレーキの作用下で減速。これよりも下方から浮上してくる気泡や介在物もこの領域に入ると減速する。

【電磁ブレーキ「オフ」領域】

磁場の影響を受けずに気泡や介在物が上昇する。

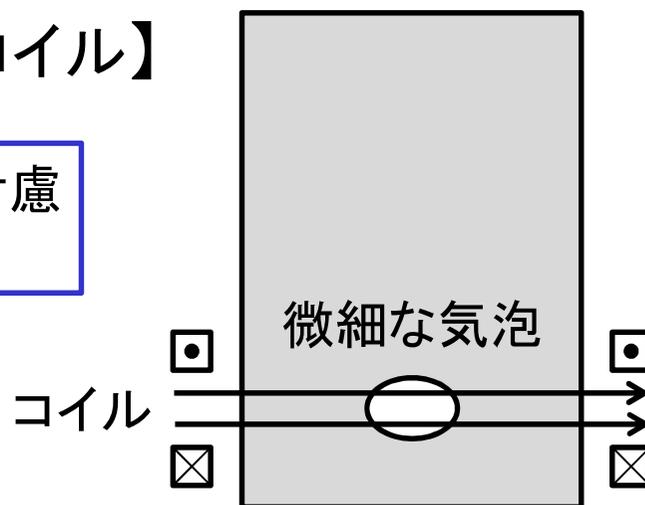


電磁ブレーキ領域のオンとオフを制御手段により切り替えると...

新旧の手法における気泡上昇の比較

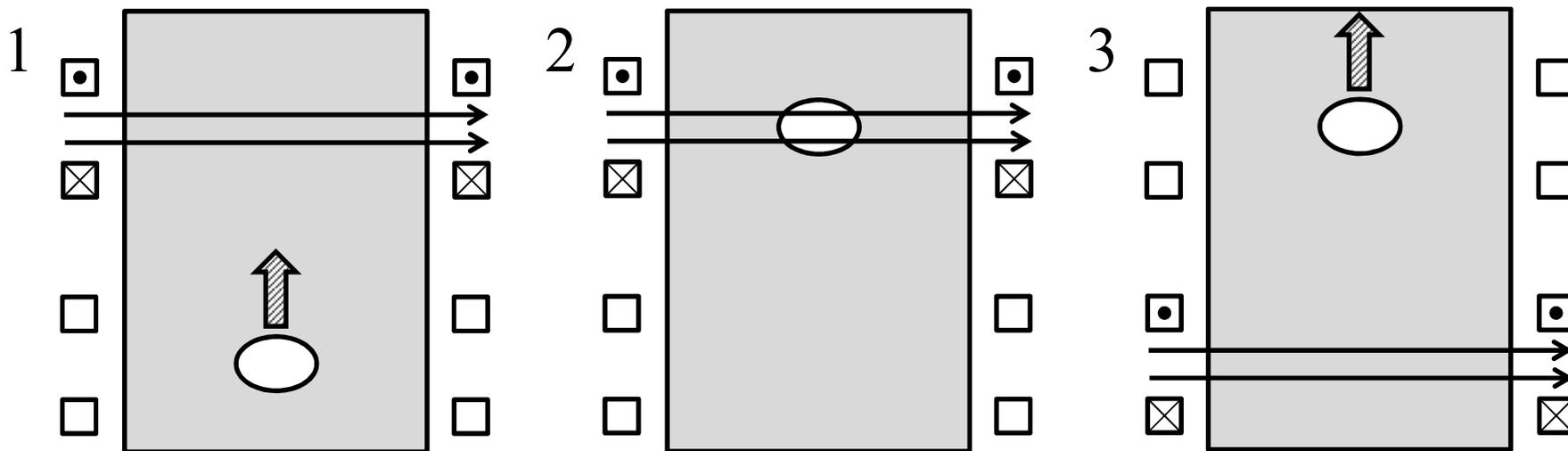
【従来の直流磁場コイル】

溶鋼の流入・流出を考慮
しない場合の現象



コイルの高さの位置に残存する微細な気泡(以下、気泡)は、強磁場により生じる電磁ブレーキによりほぼ静止してしまう。また、コイルの下方に残存する気泡が上昇しても、この位置で静止することになる。

【提案するオンオフ切替式コイル】

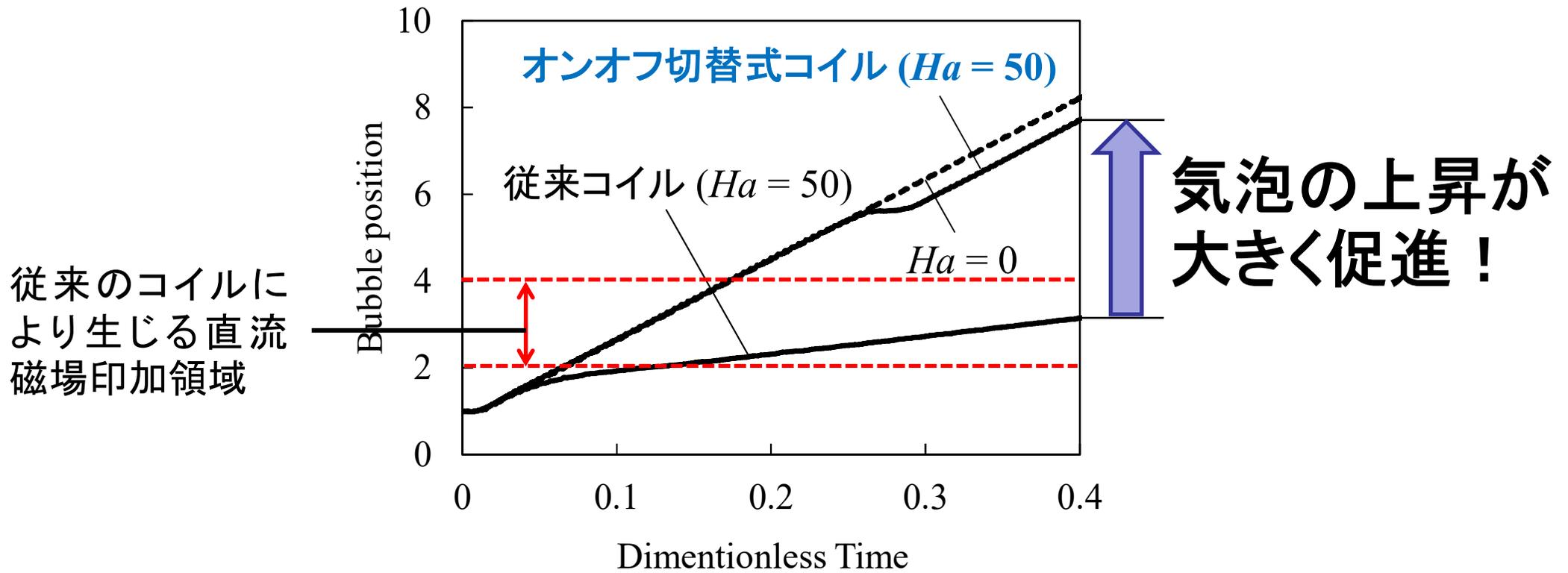


上方のコイルがON、下方のコイルがOFFになることにより、下方の強磁場により捕捉されていた気泡が上昇。

上方のコイルの位置で、気泡は電磁ブレーキの作用により一旦静止する。

上方と下方のONとOFFを切り替えることにより、気泡は**上方の磁場の束縛から解放され、さらに上昇する。**

数値計算による気泡上昇位置の比較



- 二対のオンオフ切替式コイルを適用することにより、**電磁ブレーキを維持しながら、同じ時間内に気泡が上昇する距離が大きく増加する。**
- 実際には大小様々な気泡や介在物がそれぞれ異なる位置に存在し、かつそれらは溶鋼の流れ(乱流)の影響を受けるため、正確に気泡等の上昇促進効果を評価するためには、より実現象に則したシミュレーションを実施する必要がある。

想定される用途

- **連続鋳造における内部欠陥の低減**

従来用いられている連続鋳造設備の鋳型の外側に、対となるコイルを異なる高さに二つ以上配置して、電磁ブレーキ領域のオン・オフ状態を切り替える制御手段にそれらのコイルを接続すれば達成できる技術である。

- **導電性流体中に含まれる気泡等の除去**

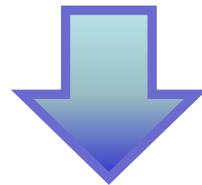
連続鋳造以外の分野においても、収容体に入れられて流れが生じている導電性流体中の気泡等を、電磁ブレーキの作用の下で効果的に除去しうる技術である。

実用化に向けた課題

- オンオフ切替式コイルの装着に関する技術的な課題は特になし
 - 現在も2段印加方式を採用
 - 既存の装置はかなり大きなものまで装着可能
 - オンオフを切り替える制御装置の作成も可能
- 本発明の効果は「やってみないと分からない」
 - 本発明により、気泡等の上昇速度の増加は期待できるが…
 - 鑄型下部の流れはどの程度の強さの乱流か？
 - 鑄型の下溶鋼内に残存する気泡や介在物の実際の量は？
 - **生産スループットの増加とともに顕著な効果を有するか？**

企業への期待

- まずはシミュレーションでの評価をお勧めします。
(共同研究も歓迎します。)
 - 浸漬ノズル、鋳型下部も含めた計算領域を設定
 - 気泡等も含めた乱流解析(できれば3次元解析)
 - オンオフ切替式コイル(電磁ブレーキ領域)の設定は容易
 - 計算結果から、鋳込み方向における気泡等の含有量等を評価
 - **鋳造速度をパラメータとして結果を比較**



- 効果が認められたら、導入をご検討ください。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 気泡又は介在物もしくは双方の除去装置及び除去方法
- 出願番号 : 特願2020-150503
- 出願人 : 国立大学法人 九州工業大学
- 発明者 : 河野 晴彦

お問い合わせ先

九州工業大学

オープンイノベーション推進機構

産学官連携本部

石田 精

TEL 093-884-3499

FAX 093-884-3531

e-mail ishida-s@ccr.kyutech.ac.jp