【報告】

USITを用いた電界紡糸装置の問題解決

機械科　針幸達也　大澤洋文　北川剛弘*

Improvement of Electrospinning Device by Unified Structured Inventive Thinking Method

Tatsuya Harikou, Hirohumi Oosawa, Takahiro Kitagawa

Recently, an electrospinning technique attracts researchers' attention in nanomaterial science, which is one of the best ways to make nanofiber. But the technique has many problems for mass production, that is, deposition of polymer material at the point of needle, decrease of spinning efficiency through unwilling corona discharge, and so on.

The problems of electrospinning were analyzed and solved by using Unified Structured Inventive Thinking (USIT) in this paper.

1．はじめに

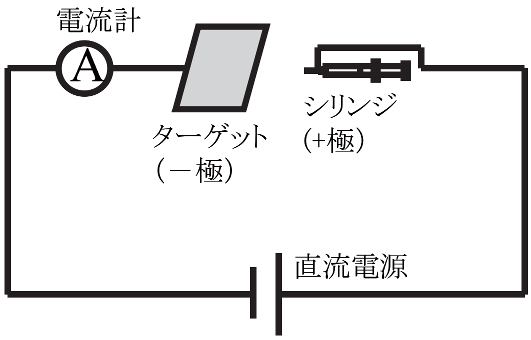

図１　電界紡糸システム概略図

電界紡糸はポリマー溶液の入ったシリンジと板状のターゲット間に電圧をかけ、ポリマーを噴射することで繊維化する方法である。システムの概略を図１に示す。

シリンジの針先に送られたポリマー溶液は針先で液滴になるが、電圧を上げ電気的な反発力が表面張力を上回ると液滴を維持できずに分裂し、ターゲットに向かいポリマー溶液の噴射が始まる。ターゲットにたどり着くまでポリマー溶液は分裂を繰り返し、引き延ばされ繊維化されながら、ターゲットにナノファイバーとして積層される。この間、表面積の莫大な増加に伴い溶媒は蒸発し、ターゲット上に乾燥したナノファイバー不織布が得られる。[1]

電界紡糸は、ナノテクノロジーが注目されている近年、脚光を浴び始めている。電界紡糸によって得られた不織布は繊維径がナノメートルオーダーであるため表面積の大きな集合体となり高機能な材料となる。そのため用途は電池のセパレータ、電磁波シールド材から人工血管、人工皮膚、人工透析と多岐にわたっている[2][3][4]。現在電界紡糸装置は実験室スケールの装置しかなく大量に広範囲に紡糸することができない。その大きな原因としては電界紡糸装置に使われている注射針にあると考えられる。注射針を使うと局所的に電荷が集中するためにポリマー溶液に対し電荷を与えやすいが、先端部が細くなっているためコロナ放電が生じ、帯電したポリマー溶液に逆の電荷を与え紡糸効率を落としてしまう。さらに注射器の先端に生じるポリマー溶液の液滴は時間経過によって溶媒が蒸発し、針先にポリマーが析出し針が詰まる。また、細い注射針の先端に生じた液滴からの紡糸では紡糸量が少なく広範囲に紡糸することは不可能である。これらの事から紡糸効率の高い量産向けの装置を作るには注射針を持たない紡糸装置が必要である。そこで今回われわれは新しい電界紡糸装置の開発のために統合的構造化発明思考法（以後USIT）を用いて注射針を用いない電界紡糸装置のアイディアの創出を行った。

2．USITとは

USITはEd. Sickafus氏によってTRIZ（発明的問題解決の理論）を改良した方法で、ソフトウエアを用いずグループワークで行うことを特徴としている。

*）現　静岡県工業技術研究所

【報告】

USITは高度に体系化されておりフローチャートに従いながらステップバイステップでアイディアの創出を行う。そのフローを図２示す。

以後このフローに従って針を用いない電界紡糸装置のアイディア創出について説明する。

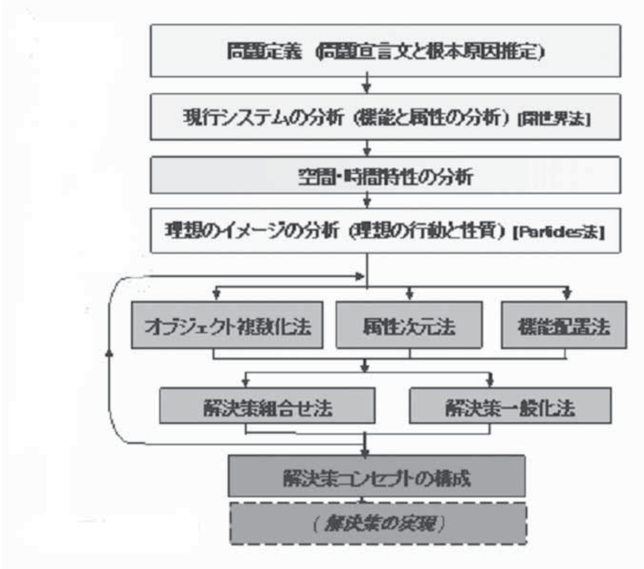

図２　USITのステップ

３．アディアの創出

３．１　問題定義

問題定義段階では困っている状況を明確にし、適切に定義された問題にすることが目的である。トラブルや困った状態に陥ったとき根本的な問題を明らかにしないと適切な問題解決はできない。USITでは

㈠　望ましくない効果
㈡　問題宣言文
㈢　問題状況のスケッチ
㈣　根本原因（根本矛盾）
㈤　関連する最小のオブジェクト群

を記述することで問題を明確にする。

電界紡糸では一度に紡糸できる面積が少ないこと、紡糸中に注射針が詰まること、コロナ放電により電荷が中和されることが現状の困っていることである。そこで㈠望ましくない効果は『電界紡糸では注射針を用いるが、紡糸面積が小さい。さらに、紡糸中に樹脂が詰まるという問題がある。またコロナ放電により帯電した液滴が中和されてしまう。生産性を考えると量産向きではない。』と記述した。

上記の問題は注射針を使うことに起因すると考えられる。そこで㈡問題宣言文は

『電界紡糸において、注射針を用いずにナノファイバーが紡糸できる方法を開発する』

これが今回の研究の目的となる。

次に㈢問題状況のスケッチでは電界紡糸中に針先の液滴で起きていることを図示した（図３）。

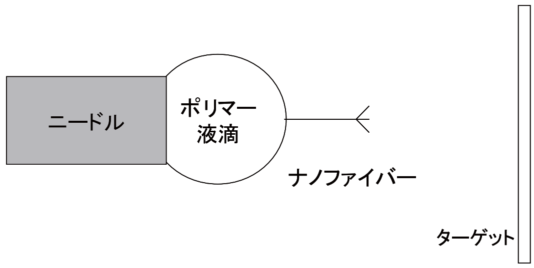

図３　問題状況のスケッチ

次に㈣根本原因（根本矛盾）は困った状況を引き起こす根本的な原因、矛盾を記述する。この記述は『液滴を作るために、あるいは電界強度を簡単に高めるためには、注射針を使いたいが、生産性が低く、紡糸トラブルを引き起こす注射針は使いたくない』となる。現在の電界紡糸装置には注射針を使いたいが、使いたくないという根本的な矛盾が存在する。

USITのオブジェクトとはそのシステムを構成する構成要素のことである。USITの場合、環境も含めてオブジェクトとする。現在の電界紡糸装置を構成するオブジェクト群を表１に示す。

以上で問題定義段階は終了である。これによって解決すべき問題が明らかになった。

表１　電界紡糸を構成するオブジェクト群

オブジェクト
シリンジ
ピストン
ニードル
ターゲット
直流電源
ポリマー溶液
電極間に存在する気体
シリンジポンプ

つづいて問題分析のステップに入る。

3．2　問題分析

3．2．1　機能と属性の分析

USITにおける属性とはオブジェクトがもつ性質を表し、重さ、形、材質、粘性などである。

具体的な数字など（10kgや赤色）は特性の値であって、属性としない。USITでは、特性値にとらわれて、発想できなくなることを避けるため、特性値を取り扱わない。問題解決の場面で、属性を変化させることで解決を図ることがある。どんな属性が役に立つかわからないため、できるだけ数多くの属性を列記することが重要である。機能はオブジェクト間に働く作用をあらわす。はじめにオブジェクトの属性を表2に示す。表2に列挙したオブジェクトと属性を機能によって結びつけ機能ダイヤグラムを作成する（図４）。矢印が集中しているオブジェクト、もしくは矢印が多く出ているオブジェクトは改良の余地があると考えられる。電界紡糸の場合ニードルに矢印が集中し、出ている。このことからもニードルを改良しなければいけないことが分かる。

続いて定性変化グラフを作成する。定性変化グラフは属性の値が増大すると問題となる効果が増大するものと減少するものをオブジェクトごとに検討する。グラフは正確に記述する必要は無く、増加傾向か減少傾向かがわかればよい。問題解決のためには悪い効果を生じさせる属性をなくす、もしくは悪い効果を生じさせる属性を益に転じることを考える必要がある。定性変化グラフは悪い効果が減少する方向に解決策を考えるための助けになる。電界紡糸は液滴表面に生じる表面張力と電気的反発力のバランスが崩れることで紡糸が始まる。そのため今回は液滴で生じる表面張力と電気的な反発力に注目した。この二つの定性変化グラフを図５に示す。

表２　オブジェクトとその属性

オブジェクト	属性
シリンジ	大きさ、形状
ピストン	大きさ、形状
ニードル	大きさ、形状、導電性
ターゲット	大きさ、形状、導電性
直流電源	電流、電圧
ポリマー溶液	粘性、電気的反発力、表面張力
電極間に存在する気体	温湿度、密度、体積
シリンジポンプ	圧力

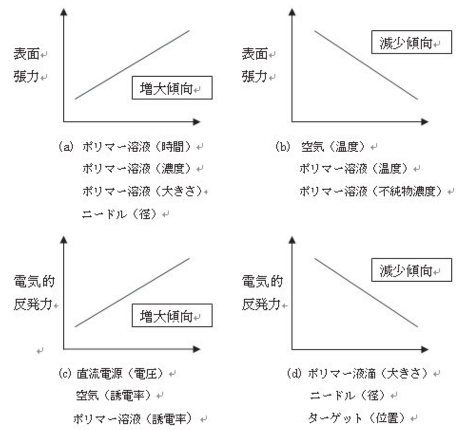

図５　定性変化グラフ

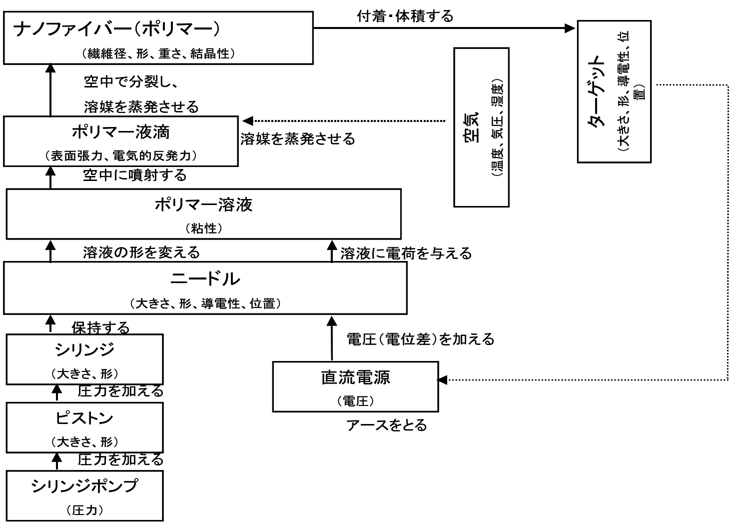

図４　電界紡糸の機能ダイヤグラム

【報告】

３．２．２　時間・空間特性の分析

次に時間と空間に関するシステムの特徴をとらえる。グラフは縦軸を問題となる悪い効果、横軸をシステムの特徴を表す空間および時間に関する座標とする。これは物理的矛盾（正、逆の対立する要求が同時に存在する状態）を解決するためには時間で分離するか、空間で分離するしか方法が無いため、その分離するタイミング、場所を見つけ出すヒントになる。

電界紡糸の時間空間分析のグラフを図6に示す。このグラフから表面張力は時間経過とともに大きくなるため、なるべく早い時点で紡糸をするのが有利だということが分かる。また空間的に見た場合、表面張力が小さいニードルの近くで多く分裂させる事が紡糸効率を高くするために重要であることが示唆される。

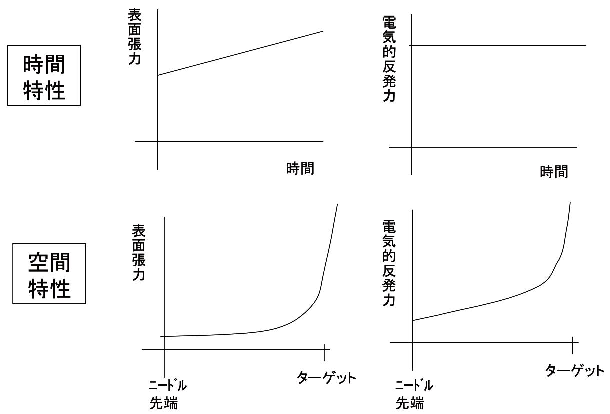

図６　時間空間特性のグラフ

３．２．３　Particles法

USITのParticles法は究極の理想状態をイメージし、現状との違いから問題解決の糸口を見つける演繹的問題解決の方法である。これはなるべく斬新で根本的な解決法を導き出すためである。究極の理想状態はコストがゼロで害が無く、ひとりでに効用を実現する状態である。そこで理想状態、現状のスケッチを行う。その際手段やメカニズムは書いてはいけない。次に理想状態と現状とで違いが有るところに×印を記入し「Particles」と考える。Particlesとは何でもできる魔法の粉で、その粉に何をしてもらいたいかを考えることが重要である。電界紡糸におけるParticles法のスケッチを図7に示す。

現状では針先にできる1個の液滴の先端部1箇所から紡糸が起こっているが、理想としては液滴のあらゆる部分から紡糸が起これば紡糸効率は高くなる。また針ではなく大きい容器のようなものから紡糸が起きればさらに紡糸効率は向上する。

次にParticlesに託すべき行動をAND/ORツリーにまとめる（図8）。この際できるだけ簡単な言葉で記述することが大切である。これは技術用語に伴う固定観念を避けるためである。

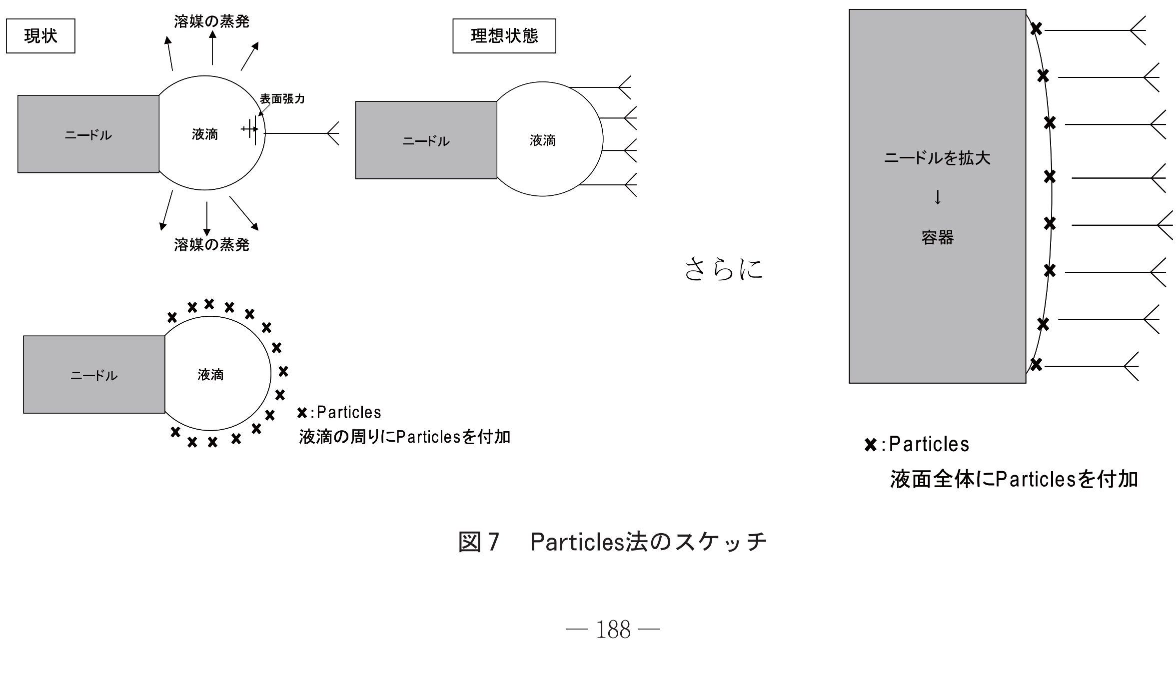

図７　Particles法のスケッチ

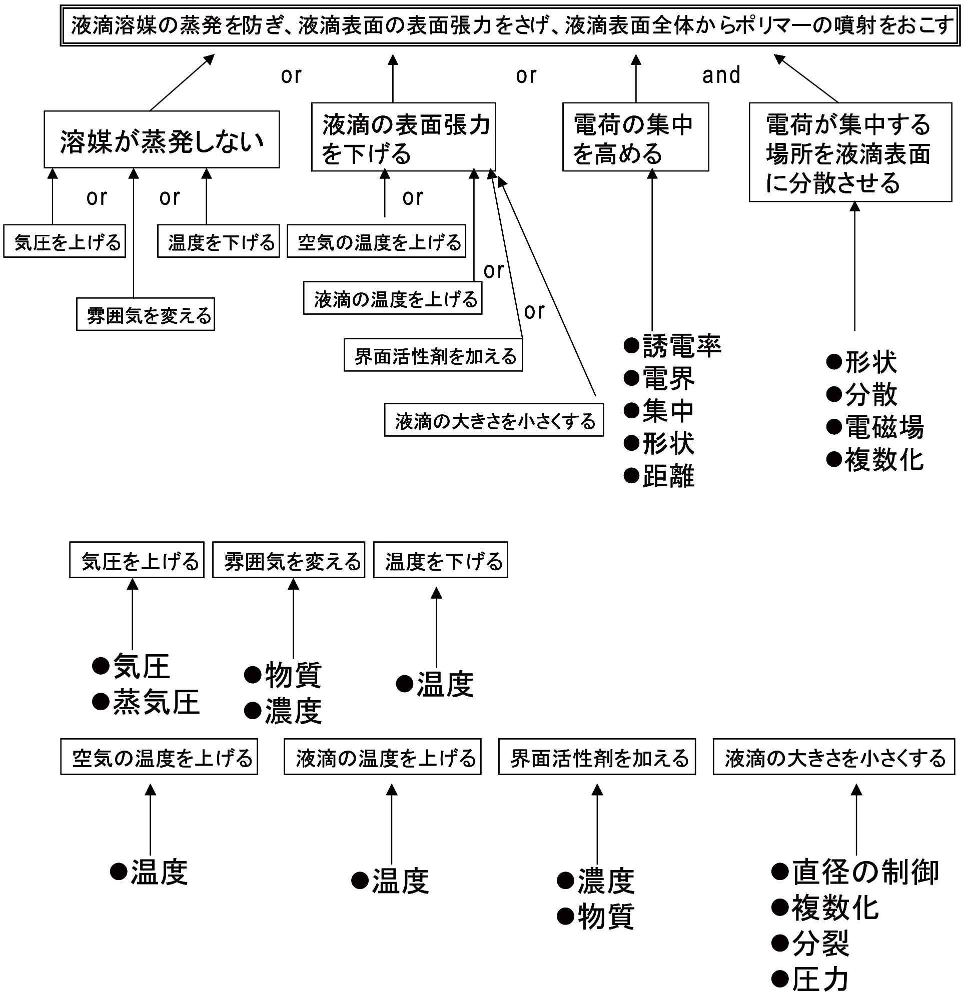

図8　AND/ORツリー

3．3　解決策の生成

これまでに行ってきた問題定義、問題分析を基に解決策の生成を行う。問題分析の過程で多くの問題解決のためのアイディアの断片が思いつくが、この段階まで伏せておく。なぜなら途中で出されたアイディアに思考が影響を受けないようにするためである。

まずアイディアの断片をブレインストーミング（ブレインライティング）で書き出していく。その際スペック、コスト、納期などは考えず自由に発想する。できるだけ多くの解決策を生成するのがUSITの方針である。ブレインストーミングを行う際に重要な点は

(1)　批判厳禁
(2)　自由奔放
(3)　質より量
(4)　付けたし、修正歓迎

である。数多く出されたアイディアの断片の中には荒唐無稽のものも含まれるが、ブレインストーミングの過程で良いアイディアに変わる可能性もある。多くの策の中から削除することは簡単にできるが、新たにアイディアをしぼり出すことは非常に難しい。そのため数多くのアイディアを出すことが重要である。さらにUSITではアイディアの創出を促す「USITオペレータ」がある。これは特許2000万件を調査して作り出されたTRIZの40の発明原理、76の発明標準解、35の進化のトレンドを再構成したもので、解決策を出すためのヒントとなる。このように導き出されたアイディアの断片から問題の解決策を生成し、実現可能かどうかを技術的、コスト的に評価し、最終的な解決策を見出す。

今回、解決策生成は6人で行った。なるべく広いアイディアを導き出すため、化学の専門3人（筆者含む)、機械の専門2人、電子の専門2人で行った。

【報告】

問題定義、問題分析は筆者１人で行い、解決策生成会議で他のメンバーに説明しアイディアを出してもらった。他のメンバーは電界紡糸についての知識はまったく無く。今回初めて聞く者もいた。生成された電界紡糸の問題解決策についていくつか紹介する。

糸を作り出す部分として稼動方式や噴射源の複数化などがあげられ、それぞれに複数の案が生成された(図７)。また糸を作り出す部分以外ではターゲットの形状の変更、電圧の印加方法の変更、電極間に温度勾配を設ける、ポリマー溶液の表面張力の低下などがあげられた。

これらを組み合わせると200以上の解決策がわずか２時間の会議で生成できた。

4　まとめ

USITは用意されたフローをステップバイステップで実行することで解決策を見出す方法である。今回、電界紡糸の問題解決に用いた。アイディア創出会議に参加したメンバーは専門外で電界紡糸に関する知識が無い者もいたにもかかわらず、わずか２時間程度の会議中に有効と考えられる解決策が200以上も創出された。USITによる方法は、しっかりとした問題分析を行うため、初めて聞く専門外の人でも現状や問題点を容易に理解できる。また、常識などの先入観を排除することで思考を問題解決へと導く巧妙な方法になっている。USITは様々な問題に適応可能と考えられる。

現在、見出された電界紡糸の問題解決策の１つについて実機を作成し検討中である。

謝辞

USITについてご指導いただいた都立産業技術大学院大学　越水重臣准教授に感謝いたします。

参考文献

１）P. K. Baumgarten: J. of Colloid and Interface Sci., 36, 71-79 (1971)
２)山下義裕：加工技術, 40, (3), 167-171 (2005)
３)山下義裕：加工技術, 40, (4), 273-275 (2005)
４)山下義裕：加工技術, 41, (9), 541-545 (2006)

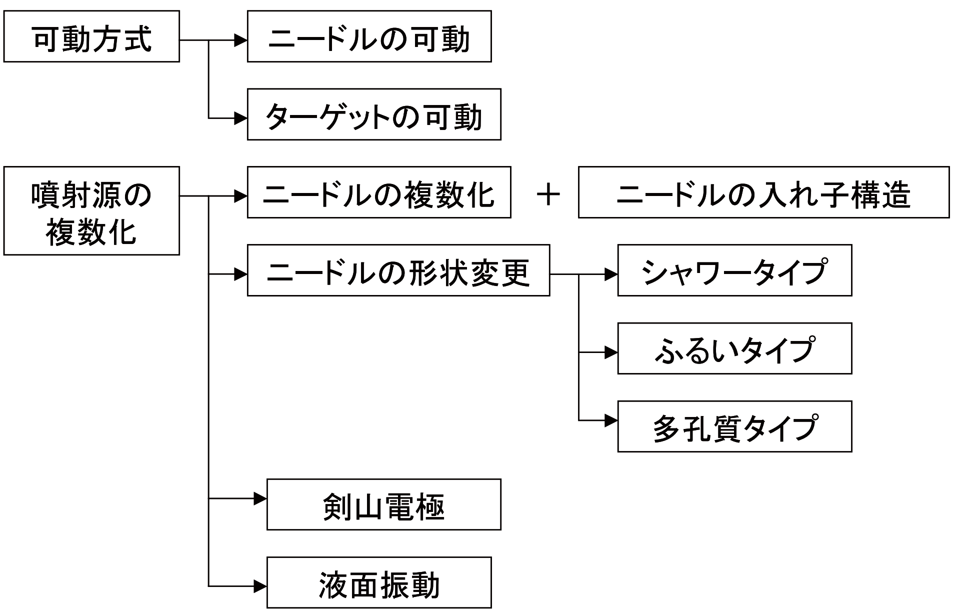

図９　解決策のアイディアの一部