

## 令和CAST「社会にインパクトある研究」

### 第4回 討論会「エネルギー社会システムが迎えた変革期に 大学はどう対応できるか」

日 時：令和4年6月8日(水)13:00～16:00

開催方法：WEB形式

#### この討論会の重要なポイント

題目「エネルギー社会システムが迎えた変革期に大学はどう対応できるか」の議論を深める。

- [1] **趣旨説明** 日本のエネルギー自給率は11%。気候変動対策とエネルギー等の安全保障の両立のため、原子力発電や再エネ・省エネの問題が重要。地熱発電と原子力発電は、この数年での比率は小さい。これに対し、学術的に何が問題か、学術的に提言を出す、包括的に見ることも含めて、大学あるいは学術に何ができるかを議論する(金井)。
- [2] **土屋教授の発表「地熱の利用と困難さー日本における現状について」と討論内容**
- (1) 日本の地熱エネルギーは、ポテンシャルとしては世界第3位の2,347万kW分あるが、現在の地熱発電は60万kW(600MW)、比率は0.2～0.3%と僅か。
  - (2) 特に2000年以降、開発が停滞している理由には、技術的な課題と社会的課題がある。
  - (3) 世界の地熱発電所(タービン)の半分は日本製。
  - (4) 2000年以降、日本の政府予算としてのR&D予算は急減。
  - (5) 設備利用率(稼働率)では、地熱発電は太陽光発電の7倍ある。
  - (6) ヨーロッパが、地熱に対して関心を持ちR&D予算を確保しているのは、発電ではなく熱エネルギーとしての利用が大きい。
  - (7) 日本の地熱発電は、東北電力と九州電力管内が主。九州地方では、温泉を使ったバイナリー発電(300kW～1,000kW)が行われている。バイナリー発電は非常に有望な技術であるが、イスラエルの会社がバイナリー発電の世界のマーケットのほぼ100%を独占している。それに対し、日本の大手企業は撤退している(池ノ上, 土屋)。
  - (8) **地熱開発の問題点**として、①80%の地熱資源が国立公園にある問題。②温泉と地熱の対立問題。③高い開発コスト、長い開発期間という問題。技術的な問題として、④開発の不確実性、⑤地熱開発により誘発される地震の問題がある。
  - (9) ①国立公園問題は、規制緩和が進み、第2種の場所からの**傾斜掘り**を行えば問題は生じない。
  - (10) ②**温泉問題は非常に根深い**。温泉オーナーは地熱発電に対してウェルカムではない。温泉と地熱発電のコンフリクトの問題は、温泉オーナーに対して地熱開発をした時の経済的効果がほとんどないことばかりでなく、自分の温泉が枯渇する恐怖がある。これが地熱開発の進まない最大の要因。そのための温泉のモニターも温泉オーナーは拒む。温泉は200メートル掘れば十分である一方、地熱発電は1,500メートルなので、地質学的には差があるが、科学技術に絶対はあり得ないため、絶対に安全だと説明はできない。→**大学が、技術を正しく評価、不安を解消、関係者のマインドセットを行うことが必要**なのではないか(本江)。
  - (11) ③コストの問題: 固定価格買取制度は、2012年頃、1万5,000kW未満は、1kWh当たり40円で買い取り、1万5,000kW以上の大規模なものは26円、15年間保証と、業界団体の言い値で決まった。同時期に制度ができた太陽光発電では、最初は46円だったのが、今は10～11円まで低下しているが、地熱は当初から変わっていない。**地熱発電は今、確かにビジネスとして成り立つ状態**になったが、大手メーカーでも地熱発電は有利な1万5,000kW未満を作る傾向にある。
  - (12) ④**開発の不確実性**や、⑤**誘発地震問題**は、技術的な問題となるが、学術研究として、我々は「**超臨界地熱発電研究**」などを進めている。

つづく

- (13) 学際研究重点拠点「エネルギー価値学創生研究推進拠点」をつくり、エネルギーを単なる熱量だけではなく、それに何らかの「価値」を見出す、単純なエネルギー生産ではなく、そこに価値を見出すための研究推進を行っている。
- (14) 1750年頃、産業革命で石炭の時代が幕開き、1850年石油掘削が開始し石油時代の到来、1950年に原子力発電が登場。今カーボンニュートラルなどの問題が出ているが、こうした歴史の趨勢から、2050年にはまた異なったエネルギー社会システムが出来上がってくる可能性がある。
- (15) 今後、日本は人口が減少し、かつ省エネ技術が進んでいく結果、日本のエネルギー使用量は低下する。つまり、世界のトレンドと日本のトレンドは異なる。2050年の世界と日本では一体何が起きるかを考える必要がある。グローバル化された経済・エネルギー市場では、日本企業は太刀打ちできない、その隙間を縫っていくしかないのが現状で、日本企業は世界のエネルギー市場に影響力をおよぼすことができないという状態。世界では、風力や太陽光、地熱発電が、2000年から右肩上がりに上がっている。
- (16) 安全保障、経済性、環境性の3つの意義から、エネルギー政策は150年間日本の国策であったが、これが立ち行かなくなる可能性が出てきた。こうした事態を技術と社会システムが変えていくだろうと予想できる。
- (17) 2021年のエネルギー白書では、「2005年をピークに、最終エネルギー消費は減少する」と書いている。この減少の理由を最終エネルギー消費が減少したとだけ書いているが、この理由が一体何なのかということまで深掘りできていない。
- (18) 太陽光発電や風力発電も増えているが、これ以上、これらの電源を既存の電力系統に大規模に導入することができないと言われ、様々な矛盾が顕在化してきている。大きな変革が必要とされる。
- (19) エネルギーの社会システムは、本来は多様だが、日本は電力が自由化されたと言いながら、非常に画一化され脆弱化している。エネルギーの作り方、使い方にも「新しい価値観」が必要。口を開いていけば、そこに餌を入れてくれる時代が終焉を迎える。自分たちで作り方、使い方を考えていくこと、それは、「価値観をつくっていく」こと。それを支えるための「学術を育てること」が必要。具体的には、現状は、鳥が口を開けているところにエネルギーが投入され、それで終わり。しかし、その後、電気エネルギーが熱になって消散してしまう、つまりエネルギーをサーキュラーエコノミーの中に組み入れる仕組みができていない。一方通行でしか進めてこなかった。そこを今後変えられるのではないか。それが「エネルギーに新しい価値を見出すこと」になるのではないか。
- (20) 地熱発電において、パイプラインのパイプ製造は、技術的に解決されている。今後さらに厳しい環境下で使う場合のステンレスパイプやオールチタンは、コストの問題となる。超臨界地熱発電では、耐えられる材料としてはオールチタンを考えている(市川、土屋)。
- (21) 様々なエネルギーの選択肢のポートフォリオを眺めて最終的に決めるのは投資家であり、消費者であり、有権者である。市場が失敗しないよう、どういった確かな情報を大学が伝えていくのが、大事ではないか。例えば、エネルギー消費がスケールダウンしているのに、他方で逼迫しているミスマッチ、温泉のオーナーに対する保証がうまくいかないことなど(秋田)。

### [3] 新堀雄一教授の発表「原子力の利用と放射性廃棄物—日本における現状について」と討論

- (1) 天然ウランのうちの0.7%程度が、核分裂しやすい $^{235}\text{U}$ で、 $^{238}\text{U}$ は99.3%ある。軽水炉では、 $^{235}\text{U}$ を3~5%に濃縮して核分裂させるという形でエネルギーを使っている。中性子が $^{235}\text{U}$ に衝突すると、 $^{235}\text{U}$ が $^{236}\text{U}$ になったあと、2つの核分裂生成物 $A_1$ 、 $A_2$ と平均2.42個の中性子が出て、その際の質量欠損分 $\Delta m$ に相当する $E = \Delta m c^2 = 200 \text{ MeV}$ のエネルギーが生まれる。1モルでは、アボガドロ数を掛けて $1.9 \times 10^{13} \text{ J}$ となる。グラム当たりでは、石油系燃料で $4.4 \times 10^4 \text{ J/g}$ に対し、 $^{235}\text{U}$ は $8.1 \times 10^{10} \text{ J/g}$ と石油系燃料よりも6桁も大きい。

つづく

- (2) ある核種について、その原子核の質量を $M$ 、質量数を $A$ 、原子番号を $Z$ とし、単体の陽子および中性子の質量をそれぞれ $M_p$ 、 $M_n$ としたときに、質量欠損 $B$ は、 $B = M_p Z + M_n(A - Z) - M$ で表される。質量欠損分 $B$ に相当するエネルギー $E = B c^2$ を陽子および中性子(何れも核子)の合計の数で割って、1核子当たりの結合エネルギー(反応の前後の質量欠損によって放出されるエネルギー)を質量数 $A$ ごとに求めてみると、**ウランが核分裂して、鉄の方に移って安定することが分かる**。逆に、質量数の小さい方から鉄の方に移って安定する核融合も示される。
- (3) ある核種の核分裂反応を利用してエネルギーを得るということは、核分裂生成物 $A_1$   $A_2$ のクラウドができ、それが安定していく、その間に、放射線を出す。その半減期は各核種によって異なり、それをどう扱うかが**放射性廃棄物**の問題につながる。
- (4) 放射性廃棄物として、使用済み燃料の**5%が「高レベル廃液」**、95%はウランとプルトニウム。それを再利用するため、95%のリサイクルを考えるのが**「再処理の技術」**になる。100万kW級原発の1年分の稼働により発生する使用済み燃料は30トン、高レベル廃液は0.9トン出る。その中身には、ストロンチウム90、セシウム137(半減期10-30年)のほか。セシウム135は230万年、ヨウ素129は1,570万年の半減期を持つ。そのほか、ウランより重い核種であるアメリシウムAmなどのマイナーアクチノイド(MA)ができるが、半減期が長く、またアルファ崩壊するため毒性が強い。
- (5) 原子力発電を利用して始めてから2030年半ばまでに、全ての使用済み燃料の**「高レベル廃液」**を入れるガラス固化体の本数は、約4万本と言われる。**地層処分**の場合には、300mの深いところに埋設する。
- (6) 潜在的有害度で考えると、**軽水炉**を使い、そのまま再処理しないで使用済み燃料自体を直接処分してしまう場合(フィンランド、スウェーデン、米国)、時間が経ってもなかなか毒性が下がらない。一方、日本やフランスで目指している**軽水炉再処理**では、天然ウランの毒性に至るまでの期間が8,000年程度に縮まる。さらに**高速炉**は、現状では様々トラブル等があるが、それが300~1000年に短縮でき、非常に魅力である。
- (7) 発電所を**廃炉**するときに出てくる低レベル放射性廃棄物は、中深度70mよりも深い地層に埋設する計画がある。
- (8) 例えば、ヨウ素129は非常に長い半減期を持つが、化学形態が陰イオンである。一方、地下の岩盤表面は負に帯電している。すなわち、マイナスとマイナス同士で反発しあい、地下水と一緒にヨウ素のような陰イオンは移動してしまう可能性がある。処分深度の選択には、単に濃度だけでなく、化学形態の把握も重要となる。
- (9) **福島第1事故に伴う放射性廃棄物**は、通常炉に比べて2桁も高いと言われ、通常は非放射性廃棄物として扱える部分が、放射性廃棄物になり、物量としては非常に多くなる。これらをいかに**低減・減容**させるかが重要となる。
- (10) 放射性廃棄物の処分に設ける**管理期間**は、地層処分では50年以上アクセス坑道を閉鎖しないことが必要となる。地下の状態を監視し段階的な事業の進行が非常に重要と私も強く主張している。私が一番関心するのは、事業の可逆性、廃棄物の回収可能性の維持ということ。これらの制度化と技術的検討が重要と考えている。未知の部分を含む**自然と科学技術の創成とのバランス**を強く意識した**段階的な対応**が必要と思っている。
- (11) 以上の内容について**社会からの信頼感**を醸成するため、学術的にも進めると同時に、産業界も規制遵守はもちろんのこと一層の自主管理を進めることが肝心である。
- (12) 原子力・量子工学分野での今後の大きなイノベーションとしては、長寿命の核種を短寿命に人工的にする**「核変換」**と、「核融合」の利用がある。
- (13) 学生のうち数%は、こうした困難な課題の解決を希望しており、大学としては、そうした**学生の挑戦する気概**を大切に考えている。
- (14) 原子核・量子工学を学ぶ学生は、多岐に亘る学問を学際的に結びつけるいわゆる総合工学を学んでおり、もの事の本質を理解し、**全体を俯瞰する能力と習慣**が付き、それらが、卒業生が社会で活躍している人が多い理由になるかもしれない。
- (15) **放射線の医療利用**では、短半減期の核種を使ってがん細胞にデリバリーしてがん細胞を壊す。そのため当該核種を製造する加速器を治療施設に隣接して設置することが望ましい。

- (16) 廃炉のための処分場の立地については大きな問題になっている。廃炉の際の炉内構造物を中深度処分するためには、まず再処理工場が動かし、さらに立地についての議論を進めていく(新堀、新堀)。

#### 質疑討論(全体)

#### [4] 政府に国策として明確なポリシーがないこと、それに対して大学は何をすべきか

- (1) エネルギー白書は、以前は「日本のエネルギーはこうやって作る」という気概が見えた。しかし、ここ7, 8年パターン化した作り方となり、「非常に自信がない書きぶり」になっている。つまり「原子力発電、地熱発電、化石燃料の火力発電に対し、国策としてどういう方向に持っていくかの明確なポリシーを示せていない」。しかし市場は、そうしたポリシーとは別な方向にお金を集めている点に危機感がある(土屋)。
- (2) 「民間のエネルギー企業もイノベーションについてモチベーションが下がっているようだ」と、卒業生に見切られてしまう状況にあることは、**官民ともに危うい**。ではどういう立て直し方・マインドセットがあるのか(本江)。
- (3) 大学が、いい意味で、日本の科学技術政策に対して**提言・圧力を掛ける**ことができないか(武田)
- (4) 都市部への集中と、地方の過疎化が進み状況が全く異なるのに、国策として全国一律に進めようとするには限界があるのではないか。自治体間や企業間に関して競争原理が働いていない(武田)。欧州ぐらいの**意思決定のサイズ**(人口、面積、発電量など色々定義できる)の方が色々決めやすい(本江)。
- (5) 大学教員が集まり、**国の政治を動かすための戦略**を取らないといけない。多くの人は、国も、企業も、大学も、社会もおかしいと思っている。誰がやるかということが大事である(佐々木)。
- (6) 地熱、原発を含むエネルギーの問題は、「総合技術」。特定の分野だけが責任を持つのではなく、社会全体に関わる、非常に範囲の広いもの。一方、工学研究科も様々な技術が細分化し要素技術研究が主になってしまって、「**全体を俯瞰的に考えられる人**」が少ない。実際、電力会社の方と話しても、土木のマスターは土木、これは機械というような、セクショナルリズムが明確で、チーム全体として課題を解決する意識を持つ必要がある。したがって、大学の工学研究も、社会課題は総合技術として捉え、個別の問題に矮小化しなければ、もっといい解決策が出てくるだろう(風間)。
- (7) 福島第一の事故も、建築は建屋を頑丈にすることだけ考え、電源を気にしていなかったから起きたので、全体が俯瞰できる人を育成する必要がある、**工学教育を今後どうするのか**を今真剣に考えなければいけない(持田)。
- (8) 研究室における普段の研究指導において、**どれだけ学生と俯瞰に関する議論をしているか**ということになる。研究、データの解釈の話はするが、広い範囲での議論に時間を使わなくなってきたかもしれない。このような討論会も、様々な方に聞いてもらいたい。**東北大学工学研究科の特徴**にもなっていく(新堀)。
- (9) 俯瞰には、様々な領域もあるし、過去～未来の時間的な側面もある。**この俯瞰は、いまの日本では至る所で欠けている**。また、地方は口を開けて待っている状況で、国が概ねを決め、地方が自由に地方色を出して進める体制にはない。大学においても、基礎に偏り、全体を見ることができない状況になっている。大学として必要なことは、全体を俯瞰するための教育、あるいは**大学研究者も全体を俯瞰するために努力し**様々チームをつくり新しいことを提言することが重要(後藤)。

つづく

[5] 国の重要な事項(エネルギー, 食料, 防衛, 貿易収支, 財政赤字)に関する議論が行われないこと

- (1) 台湾有事によって、日本がいま約18兆円分輸入しているエネルギーが止まる。こうした有事に備え、**エネルギーや食料の自給**を考えざるを得ないが、そのため日本がどうすべきかの議論がない。何をにおいてもエネルギー問題は一番に考えて答えを出すという決意と信念が社会政策上も、科学技術上も必要な気がする(佐々木, 小倉)。
- (2) 台湾有事を想定して、いまの日本で一番欠けているのは、日本の国民全体の中に、**自分達の国や生活は自分で守る**ということ。新しい資本主義とか言っているが、それ以前にやらなければいけないことがある(佐々木)。
- (3) 最近5, 6年、**日本の貿易収支は赤字**になっている。昔の「加工貿易」は、もう通じなくなった、という事を脇に置いて、科学技術をどうするべきか、米国に追いつけ追い越せと盛んに議論しているが、現実的に加工貿易が成り立たなくなったときに、国民の生活をどう支えるかという議論もない(佐々木)。
- (4) **国の財政**は、1,000兆円を超える赤字になっている。今盛んに言われているのは、Society5.0, 遺伝子治療。しかし、それ以前にやらなければいけないことは、国民生活のエネルギーを、例えば18兆円の半分でもいいから、自給できたら、国民の力が上がるのではないか(佐々木)。
- (5) 国が為すべきことをやらないことで、現在、**様々な社会問題が深刻なまま放置**されている。地方分権ならいいといっても、課題によっては、国の司令塔は必要。「エリート意識」が叩かれ、地方自治で国でも、「俺達がやる」というエリートがいなくなった。1990年頃、自分の指導教官など、**旧帝大の教授クラスは皆、日本のことを考えていた**が、今年年代で話していても、日本という単位ではなく、東北大のランキングがどうだ、という話になる。国立大学の教員として、国という単位で貢献するということが重要(持田)。

[6] 国の発電量の50%を地熱発電にするための提言

- (1) **国の中の発電量の半分を地熱発電**にしようとしたときに、どれだけの投資と維持費がかかるかという概算はできるか?(佐々木)。
- (2) それはできます。現在の技術では、多分1,000万kWぐらいが上限であるが、それを超える技術として「超臨界地熱発電」を開発しており、概算で数倍の5,000万kW(原発50基分)は確保できる。東北地方で10万kWの超臨界地熱発電所は50か所ぐらい造れる。1基の超臨界地熱発電所を造るに必要な経費の見積もりもできている(土屋)。
- (3) 全体の投資額を算出する。そのため、1基の超臨界地熱発電所を造るに必要な経費、温泉関係者など利害関係者の補償額、電気単価、国の50%を地熱発電にすることで減少する化石燃料の輸入額を用いる。これらから、**国家戦略として取り上げてもらえるよう提言**を作成できる。さらに10年間この開発投資をすると、コストをどれだけ下げることができ、現在の火力発電・LNG発電・石炭火力との単価・二酸化炭素排出量の比較もできる。そして国全体では、10兆円とかの金が返ってきて、国民に還元できるというイメージがつけられるといい(佐々木)。
- (4) さらにその回収された熱エネルギー(廃熱水)を活用すると、**農業の再生**もでき、食料の輸入をどの程度抑制できるかのイメージが描ける(佐々木)。
- (5) **国の発電のポートフォリオ**を書き換える、地熱発電の割合を大きくするビジョン、そのシミュレーションと、それに基づくロビー活動、それを政策として実現していく動きを大学から起こせないか。70年代、日本では、原子力発電を30%まで持っていくことを国で決めてやってきた。その過程と同じことを地熱発電でできないか、ということ(本江)。
- (6) 70年代、原子力発電は、夢のエネルギーとして、マスコミも応援していた雰囲気があり、政治家のリーダーシップが非常に大きく、官僚も進め易かった。特に、原子力発電や地熱発電のように、**開発リーディングタイムが長いもの**に関しては、政策がしっかりできていないと、民間企業は動けない(新堀)。

つづく

- (7) 日本のエネルギーの国策は、一言で言えば、**エネルギーミックス**:化石燃料, 原子力, 再生可能エネルギーを適度にミックスして維持していくのが、今のエネルギー政策の基本的な考え方。現状では90%を化石燃料に依存し、その化石燃料はグローバル経済の中で調達している。そのグローバル経済を、日本の企業は制御するだけの力は持っていない。したがって、隙間をうまく立ち回ることが前提のシステムと言える。一方、都市と地方の大きな格差、人口減少、インフラ維持の困難さの現状で、**全国で中央集権的に画一的エネルギーシステムを維持することは難しく**なってくる。そうすると、**今後は分散化**に向かうだろう。そこに対し、技術、社会システムを機能させる点に、大学が貢献できる(土屋)。
- (8) 欧州は、ロシアから大量のガスと石油を買っている。欧州発の「**カーボンニュートラル**」は見かけ上の通過点か分からないが、日本では、「**カーボンを出さない、作らない、処分しない**」ができる方法を求め、国全体でできる政策をつくる。原子力もかつてはそうであった。地熱発電には、日本の持っている国策で、一番優れていて、子孫に迷惑をかけない政策だと自信を持つことができる。様々課題はあるが、それを克服するための提言は、進めたらよい(佐々木)。

#### [7] 現在の国の体制下における方向性決定が難しいこと

- (1) 私自身が危機感をもっているのは、**民主主義が、本当は進めればよいことを決めるための「阻害要因」**になっていること。私の分野での例では「住宅の省エネ基準をもっと強化する」とか、東京都が「住宅の屋根全部に太陽光パネルを義務化する」ということが憲法との関係があり、住宅に強い規制を掛けていいのという議論で決まらない。また、危険なところに住んでいる人のため、砂防ダムを造るより移住して貰った方が安上がりな訳だが、「移住して貰えないから砂防ダムを造る」ということになってしまう。要するに、様々な局面で、憲法との関係で行政がどこまで介入できるかということが鍵になっていると思う(持田)。
- (2) 最近の日本の政治家は、2世、3世が、3分の2ぐらい占めている。1980~90年頃というのは、元官僚とか元経営者という人が政治家になっていた。米国では、政権を支えるスタッフには、様々な人種・様々な考え方の人・様々な大学の先生が集まり、議論して政策を決めている。一方、**日本は、政策がモノカルチャーになり、政策決定が世間から分離**してしまっている。したがって、いまの日本では、気がついた人達が提言し、政治家に働きかける努力をしないと、国家戦略は作れない(佐々木)。
- (3) したがって、大学としては、こういう討論会を通し、それぞれの分野ごとに、**自分達でできることを地道に積み上げ、提言を出していく**ことが必要となる(細谷)。