

УДК 537.32

Кадзікава Т., Фунахаші Р.



Кадзікава Т.



Фунахаші Р.

¹Технологічний інститут Шонан,
²Національний інститут передової промислової
науки й техніки

**НОВІТНІ РОЗРОБКИ В ГАЛУЗІ
ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ
ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЯПОНІЇ**

Технологія термоелектричного генерування електроенергії (ТЕГЕЕ) у Японії сприймається як одна з інноваційних енергетичних технологій, що сприяють становленню суспільства комфортного життя в реальному світі в найближчому майбутньому під тиском існуючих глобальних екологічних і серйозних енергетичних проблем (3E + S). За підтримки держави або її приватних підприємств у Японії активно виконуються науково-дослідні проекти за технологією ТЕГЕЕ: 1) дослідження в сфері керування тепловим процесом, матеріалів і технологій для утилізації невикористаного тепла в соціальному середовищі, 2) розробка додатка ТЕГЕЕ для газової цементаційної печі, 3) розробка термоелектричного генерування з використанням відпрацьованого тепла на сталеливарному заводі, 4) розробка трубчастого термоелектричного генератора, 5) розробка системи опріснення на сонячній енергії з використанням технології термоелектричного генерування електроенергії, 6) практична розробка термоелектричного генератора без рідких металів для рекуперації тепла вихлопних газів автомобілів, 7) практичне застосування багатосарового термоелектричного генератора для бездротового сенсорного мережного вузла з автономним живленням. Як перспектива на майбутнє – такі аспекти, як вдосконалені наноструктурні ТЕ матеріали, органічні/гібридні ТЕ матеріали, наука про надійність, техніка безпеки, у тому числі аналіз загроз, розглянуті з метою планомирного впровадження додатків ТЕГЕЕ у практику.

Ключові слова: технології вироблення електроенергії, наноструктурні ТЕ матеріали, термоелектричне генерування.

Thermoelectric power generation (TEPG) technology in Japan has been noticed as one of the innovative energy technologies in order to contribute to the establishment of comfortable society and individual life in the real world in the near future due to push-forward by globally environmental issues and serious energy problems (3E + S). Several R&D projects on TEPG technology in Japan have been actively ongoing such as 1) Thermal Management, Materials and Technology Research to utilize unused heat in the social environment, 2) Development of TEPG Application to a Gas Carburizing Furnace, 3) Development of Thermoelectric Generation Using Waste Heat in Steel Works, 4) Development of Tubular Thermoelectric Generator (TTEG), 5) Development of Solar Powered Desalination Using Thermoelectric Power Generation, 6) Practical Development of Rare-Metal-Free Thermoelectric Generator for Automotive Waste Heat Recovery, 7) Practical-use of Multilayer type Thermoelectric Generator for Self-powered Wireless Sensor Network Node supported by government and /or private enterprise funds. As the future prospects several aspects, such as advanced nano-structured TE materials, organic/hybrid TE materials, durability science, safety engineering including hazard analysis have been discussed aiming the smooth promotion of TEPG applications to the real world.

Key words: thermoelectric power generation, nano-structured TE, thermoelectric generation.

Вступ

Відповідно до паризької угоди – рамкової конвенції ООН про зміну клімату №21 (COP21) і базового науково-технічного плану Японії №5 (2016 – 2020), перед Японією поставлено завдання впоратися із серйозними енергетичними проблемами з так званих (3E + S), які розшифровуються як енергетична безпека (E), збереження навколишнього середовища (E), активація економіки (E) і безпека (S), у зв'язку з обмеженістю викопних ресурсів, невеликою територією країни, збереженням неймовірно високого рівня валового національного продукту й підвищенням рівня розуміння безпеки здоров'я й загроз [1]. Загальний ККД використання енергії по всій енергетичній системі в Японії становив усього близько 34 %. Це означає, що 66 % енергії, що поставляється, виділяється в навколишнє середовище у вигляді низькопотенційної теплової енергії. Тому є розуміння того, що необхідно терміново розробити передові технології тепла на основі 3 R (Reduce (зниження), Reuse (повторне використання) і Recycle (утилізація)). За цих обставин технологія ТЕГЕЕ сприймається як одна з інноваційних енергетичних технологій, що сприяють створенню суспільства комфортного життя в найближчому майбутньому. Тому державні організації, такі як Міністерство економіки, торгівлі й промисловості (METI), Міністерство освіти, культури, спорту, науки й техніки (MEXT) і Міністерство навколишнього середовища (MOE), а також різні галузі промисловості, такі як сталеливарна, хімічна, інформаційна, енергетична і т.д. мають намір приділити увагу дослідженням і розробкам за різними видами додатків ТЕГЕЕ. У Японії виконуються науково-дослідні проекти в сфері технології ТЕГЕЕ:

1. Дослідження в сфері керування тепловим процесом, матеріалів і технологій для утилізації невикористаного тепла в соціальному середовищі.
2. Розробка додатка ТТВЕ для газової цементаційної печі.
3. Розробка термоелектричного генерування з використанням відпрацьованого тепла на сталеливарному заводі.
4. Розробка трубчастого термоелектричного генератора.
5. Розробка системи опріснення на сонячній енергії з використанням технології термоелектричного генерування електроенергії.
6. Практична розробка термоелектричного генератора без рідких металів для рекуперації тепла вихлопних газів автомобілів.
7. Практичне застосування багаточарового термоелектричного генератора для бездротового сенсорного мережного вузла з автономним живленням і т.д.

У даній статті наведено аналіз новітніх розробок в області термоелектричної технології в Японії, а також розглянуто перспективи комерціалізації додатків ТТВЕ.

Деякі актуальні теми досліджень і розробок у Японії.

Дослідження в сфері керування тепловим процесом, матеріалів і технологій (Thermat)

Це підтримуваний урядом 10-літній проект наукових досліджень і розробок, мета якого – створення нових високоефективних систем, здатних забезпечити значне зниження споживання енергії й, в остаточному підсумку, допомогти раціональному використанню енергії в багатьох аспектах соціальних систем [2]. Проект Thermat здійснюється з 2013 року під керівництвом Х. Обара Національним інститутом передової промислової науки й технології (AIST) і складається з 8 основних розділів:

1. Технологія акумулювання тепла.
2. Технологія теплозахисту.
3. Технологія теплоізоляції.

4. Технологія термоелектричного перетворення.
5. Технологія рекуперації відпрацьованого тепла.
6. Технологія теплових насосів.
7. Технологія керування тепловим процесом.
8. Базова енергетична технологія.

Загальний бюджет на дослідження й розробки в 2015 році становив близько 15.4 млн \$, у тому числі близько 1.7 ~ 2.0 млн \$ на розділ технології термоелектричного перетворення.

Завдання щодо розділу технології термоелектричного перетворення полягає в наступному(кінцева мета в 2023 році):

1. Ствердження технології ТЕГЕЕ модулів на рівень $ZT = 4$ для систем неорганічних матеріалів.
2. Ствердження технології ТЕГЕЕ модулів на рівень $ZT = 2$ для систем органічних матеріалів, включаючи гібридні. Для досягнення кінцевої мети проміжна мета передбачає створення систем удосконалених ТЕГЕЕ матеріалів на основі неорганічних матеріалів $ZT = 2$ і органічних матеріалів $ZT = 1$ до 2018 року.

Шість вітчизняних частин компаній, AIST і кілька університетів об'єдналися в групу ТЕГЕЕ.

Проект ТЕГЕЕ включає 8 позицій:

1. Високоєфективні термоелектричні матеріали й пристрої на базі нанотехнології й/або технології шаруватих структур від AIST.
2. Термоелектричні пристрої й матеріали на основі високомолекулярного полімеру від AIST і Університету Осака.
3. Термоелектричний пристрій, що використовує вуглецеву систему, таку як вуглецева нанотрубка (УНТ), графіт і т.д. від AIST; зразок гнучкого термоелектричного пристрою на основі УНТ, отриманого за допомогою друкованої технології, наведено на рис. 1;

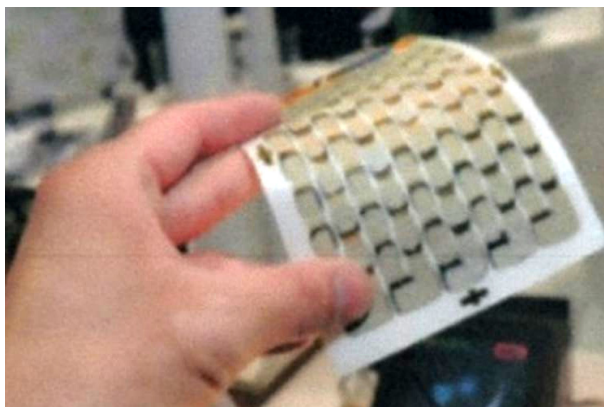


Рис. 1. Гнучкий термоелектричний пристрій на основі вуглецевої нанотрубки.

4. Термоелектричний пристрій на основі довговічних скутерудитних матеріалів, що забезпечують $ZT > 1.1$, тобто коефіцієнт перетворення 8 %, від FURUKAWA, як показують експериментальні результати щодо довговічності скутерудитних термоелектричних модулів на рис. 2.
5. Система рекуперації відпрацьованого тепла класу 5 – 10 кВт із використанням технології термоелектричного генерування електроенергії від HITACHI.
6. Гнучкі органічні термоелектричні матеріали й пристрій, що контролюють орієнтацію й розподіл УНТ і розробка вдосконаленого гібрида на основі технології одержання наночасток від FUJIFILM.

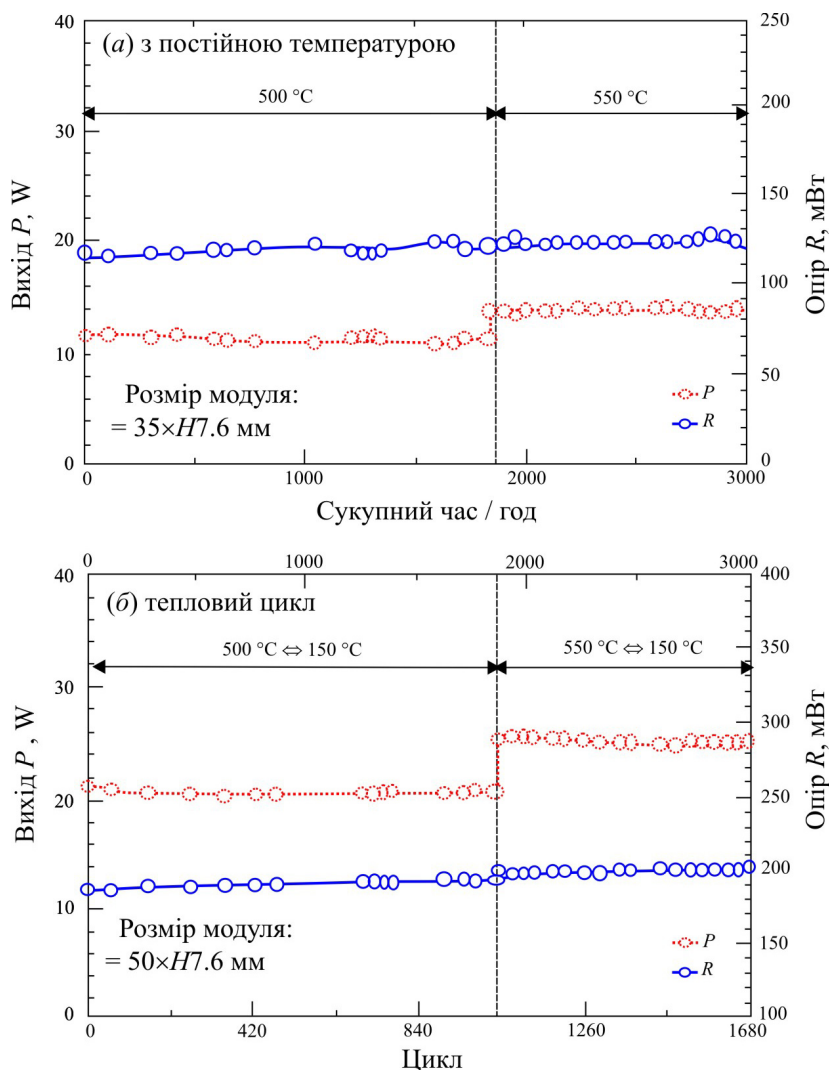


Рис. 2. Результат випробування на довговічність скутерудитних термоелектричних модулів для (а) режиму постійної температури й (б) режиму теплового циклу.

7. Високоєфективний спечений клатратний пристрій з використанням технології електродного зварювання для практичного застосування від FURUKAWA DENKO.
8. Силіцидні термоелектричні матеріали, пристрої й оптимальні системи для автомобільних додатків від Університету Ямагучи й Nippon Thermostat Inc.

Розробка технології термоелектричного генерування електроенергії (ТЕГЕЕ) із застосуванням рекуперації відпрацьованого тепла сталеплавильної системи

Сталеливарна промисловість Японії досягла значного зниження споживання енергії для одержання високоякісної сталі й прагне до подальшого підвищення ефективності цієї технології. Встановлено, що технологія рекуперації відпрацьованого тепла дуже важлива для кожної виробничої ділянки сталеливарного заводу. Технологія термоелектричного генерування електроенергії одержала перевагу з погляду надійності, компактності й екологічної безпеки.

Демонстраційний експеримент для системи ТЕГЕЕ класу 10 кВт, установлені на лінії безперервного лиття JFE, було проведено з метою комерціалізації великомасштабного застосування ТЕГЕЕ класу 100 кВт на основі відомого генераторного модуля телуриду вісмуту KELK, як показано на рис. 3.

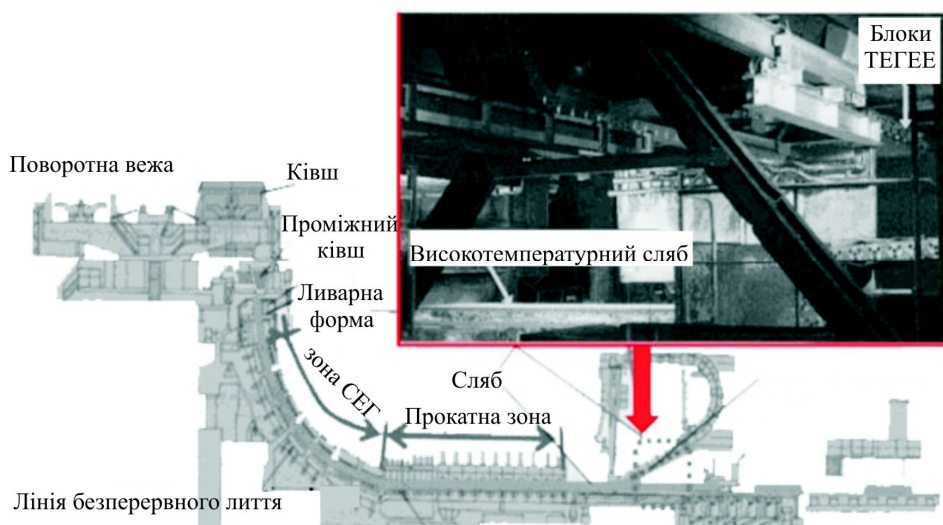


Рис. 3. Лінія безперервного лиття JFE із установленими блоками ТТВЕ.

Цей проект здійснений командою JFE, KELK й університетом Хоккайдо за часткової підтримки NEDO та індивідуального фонду по закінченні проекту NEDO [3]. Джерелом високотемпературного тепла служить теплота випромінювання від сляба, що рухається, температура якого становить близько $1073\text{ K} \sim 1273\text{ K}$, а джерелом низької температури служить заводська вода приблизно кімнатної температури. Система ТЕГЕЕ має 2 м завширшки й 4 м у довжину й складається з 56 блоків ТТВЕ, як показано на рис. 4, для генерування близько 10 кВт постійного струму із встановленим на ній пристроєм аварійних контрзаходів.

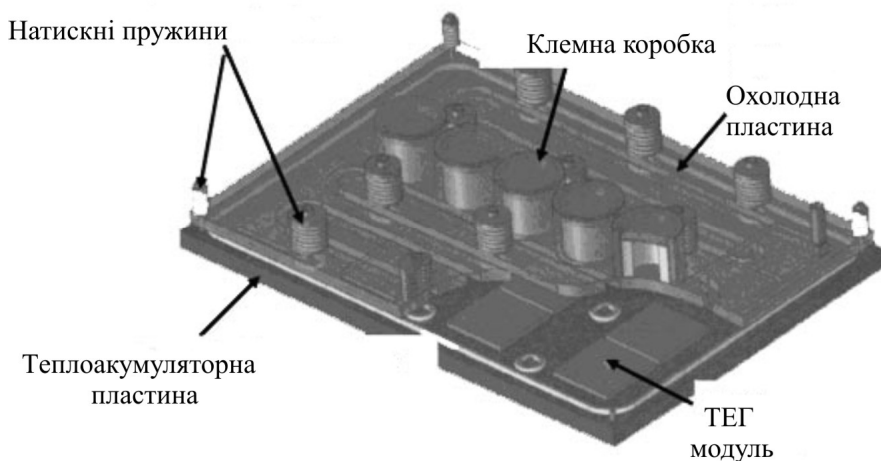


Рис. 4. Компоненти блока ТЕГ (розмір: $400\text{ мм} \times 280\text{ мм}$), що складаються з 16 промислових вискоефективних модулів ТЕГ $50\text{ мм} \times 50\text{ мм} \times 4.2\text{ мм}$ виробництва KELK.

Вихідна потужність цієї технології термоелектричного генерування електроенергії становить близько 9 кВт (тобто 1.7 кВт/м^2 на підставу модуля) за температури сляба 1188 K і ширині сляба 1.7 м. Експериментальні результати задовільно узгоджуються з розрахованими значеннями, отриманими в ході аналізу з використанням моделювання, як показано на рис. 5.

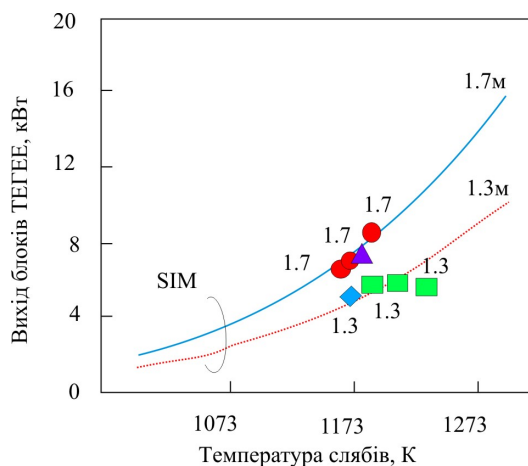


Рис. 5. Експериментальні результати виходу потужності залежно від температури сляба для системи ТТВЕ JFE у порівнянні з імітаційними моделями.

1. ● – ширина плити = 1.7 м, експеримент;
2. ▲ – ширина плити = 1.6 м, експеримент;
3. ◆ – ширина плити = 1.4 м, експеримент;
4. ■ – ширина плити = 1.3 м, експеримент;
5. ——— – ширина плити = 1.7 м, експеримент;
6. ■■■■ – ширина плити = 1.3 м, експеримент.

У майбутньому, безсумнівно, будуть отримані більш високі значення вихідної потужності завдяки розробці надійних ТЕГЕЕ модулів на рівні температури, вищій від верхньої температурної межі для модулів $Bi-Te$. Оскільки на даному етапі температура поверхні ТЕГЕЕ модулів на основі $Bi-Te$ обмежується, щоб уникнути теплової деградації.

Дослідження й розробки системи опріснення на сонячних батареях із застосуванням технології термоелектричного генерування електроенергії

Недолік прісної води – одна з найбільших соціальних проблем для всього світу в найближчому майбутньому. Виникла нагальна потреба розробки економної технології системи опріснення в поєднанні з поновлюваними джерелами енергії, такими як сонячна енергія, без споживання великого обсягу ресурсів викопного палива.

Виходячи із принципу простоти й безперервності роботи без технічного обслуговування, високої якості свіжої води, концепція гібридної системи багатоступінчастого опріснення й зворотного осмосу на сонячних батареях із застосуванням технології термоелектричного генерування електроенергії була запропонована конференцією TDS, заснованої декількома приватними компаніями й університетами під керівництвом професора І. Хорита (Токійський технологічний інститут), з міжнародним співробітництвом з 2010 року [4]. Пропонована система складається з установки концентрованої сонячної енергії з високотемпературним (близько 850 К) накопичувачем теплової енергії, новим ТЕПГ (термоелектричним і парогенератором) і двох видів систем опріснення (багатоступінчастого опріснення й зворотного осмосу) як основних підсистем, які показані на рис. 6.

Для ТЕПГ гаряча сторона ТТВЕ обладнань нагрівається високотемпературним сольовим розплавом з накопичувача теплової енергії, що живиться блоком концентрованої сонячної енергії, а холодна сторона ТТВЕ обладнань прохолоджується більшим схованим теплом постійно подаваної води для одержання низькотемпературної пари, яка використовується першим каскадом блока багатоступінчастого опріснення.

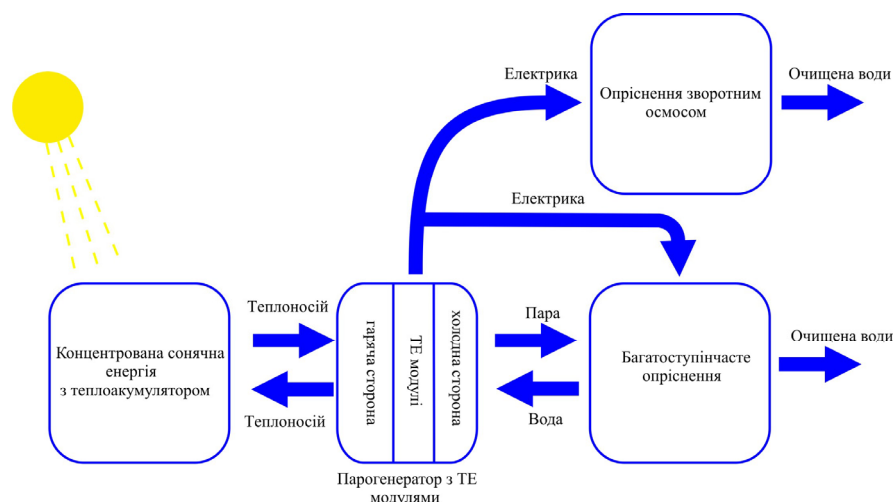


Рис. 6. Принцип системи опріснення на сонячних батареях із застосуванням термоелектричного генерування потужності.

Вся витрачена теплова енергія використовується для охолодження ТЕГЕЕ обладнань у системі ТЕПГ, ефективно й безупинно утилізується в системі, тоді як для систем ТЕГЕЕ, як звичайно, вода, що проохолоджує холодну сторону ТЕ обладнань, відводиться від системи в навколишнє середовище. Аналіз здійсненості з урахуванням оцінки вартості показав, що пропонувана система опріснення має високий потенціал, щоб бути найбільш конкурентоспроможним рішенням, принаймні на Середньому й Близькому Сході. Невеликий експеримент для підтвердження правильності концепції системи ТЕПГ як найбільш важливого компонента було проведено з метою підтвердження характеристик системи, таких як статичний тепловий баланс, динамічний відгук на баланс маси, які необхідні для точного проектування прототипу системи опріснення, що використовує сонячну енергію, в поєднанні із системою ТЕГЕЕ. Експериментальну установку показано на рис. 7.



Рис. 7. Експериментальна установка підтвердження концепції.

Практичне застосування багатосарового термоелектричного генератора для бездротового сенсорного мережного вузла з автономним джерелом живлення

Murata Manufacturing Co., Ltd на власні засоби розробила термоелектричний генератор з метою відбору енергії для бездротового сенсорного мережного вузла з автономним джерелом живлення й практичного використання із застосуванням багатосарового керамічного конденсатора для виробництва ТЕГЕЕ [5]. Термоелектричний пристрій складається з композита $Ni_{0.9}Mo_{0.1}$ і $Ni_{1-x}Mo_x$ для p -типу, і $(La,Sr_{1-x})TiO_3$ для n -типу. У термоелектричному пристрої матеріали p - і n -типу з'єднані безпосередньо без електродного металу. Між ними вставлений тонкий шар ізолятора $(Yb, Zr)O_2$. Ці матеріали були обрані завдяки однаковим

коефіцієнтам теплового розширення, що знижують термічну напругу між ними. Зразок ТТВЕ пристрою показано на рис. 8.

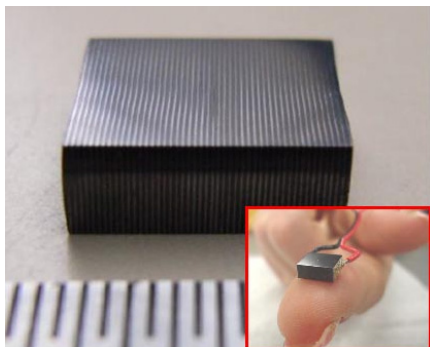


Рис. 8. Зразок ТТВЕ модуля багатощарового типу для ТТВЕ пристрою акумулювання енергії.

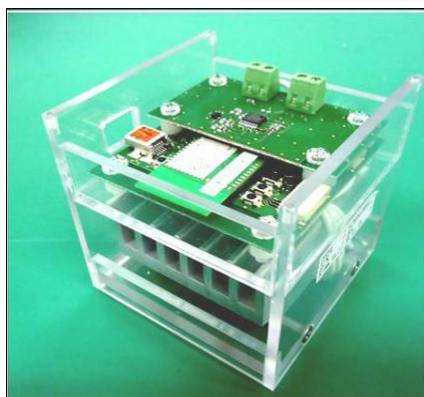


Рис. 9. Промисловий прототип вбудованого в ТТВЕ бездротового сенсорного вузла.



Рис. 10. Установка вбудованого в ТТВЕ бездротового сенсорного вузла на трубу.

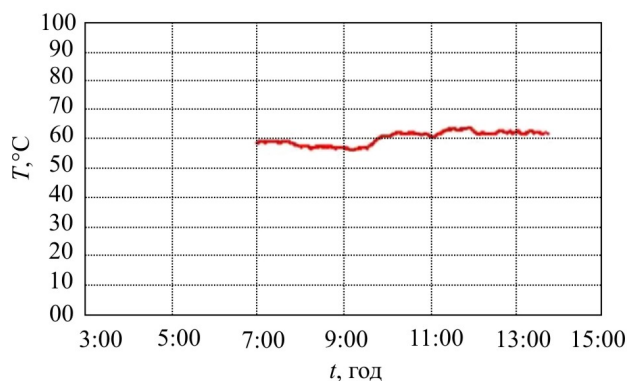


Рис. 11. Демонстраційний результат монітора температури труби.

Промисловий прототип, ТЕГЕЕ інтований з ТЕГЕЕ бездротового сенсорного вузла, був установлений, як показано на рис. 9, і закріплений на заводському сталевому трубопроводі, як показано на рис. 10. Силві характеристики термоелектричного пристрою на 50 пар розміром 6.0 мм × 6.9 мм × 2.7 мм виглядають у такий спосіб: напруга холостого ходу й максимальна вихідна потужність становлять відповідно 52.3 мВ і 105 мкВт за різниці температур 10 К. Демонстраційні

випробування успішно проводилися упродовж більше як 12 місяців з метою контролю температури через кожні 20 секунд, як показано на рис. 11.

Майбутні перспективи

Ми займалися численними дослідженнями з метою вдосконалювання технології ТЕГЕЕ для практичного застосування паралельно з описаними вище розробками для академічної науки й промислового сектора за підтримки METI, NEDO, MEXT, JST і/або часток підприємств:

- Складна наноструктурна ТЕ технологія для збільшення ZT методом «знизу-нагору» ($ZT > 4$);
- Розробка поліпшених обмежених/гібридних ТЕ матеріалів;
- Прогрес науки про надійність і техніки безпеки в області ТЕГЕЕ;
- Затвердження міжнародної стандартизації для виміру ТЕГЕЕ.

Складна наноструктурна технологія ТЕ обладнань заснована на тому, що наноструктура для Mg легованого $PbTe$ не погіршує електричні властивості, такі як коефіцієнт Зеебека й електропровідність, але незалежно знижує ґраткову теплопровідність, як встановлено AIST [6]. Отже, для оптимального наноструктурного ТЕ пристрій Mg легованого $PbTe - 4\% Na$ максимальне значення ZT можна підвищити до 1.8 за 810 К у порівнянні з максимальним значенням ZT 1.1 за 710 К для нелегованого матеріалу, як показано на рис. 12.

Зразок ТЕ модуля, що складається з восьми пар наноструктурних спечених гілок Mg легованого $PbTe - 4\% Na$ p -типу й спечених гілок $PbTe - 0.2\% PbI_2$ n -типу був успішно виготовлений і генерував 3.55 Вт за 570 К за різниці температур (високої температури 873 К і низької температури 303 К на електроді, відповідно). Визнано важливим, щоб контрольовані наноструктурні технологічні прийоми були встановлені для всіх систем термоелектричних матеріалів за формою, розміром, густиною, компонентами, і т.д. Значна увага приділялася останнім часом полімерним термоелектричним матеріалам, за такі їх переваги, як низька вартість, простота збирання, легка вага і доступність ефективного методу висхідного проектування для розширення областей застосування термоелектрики.

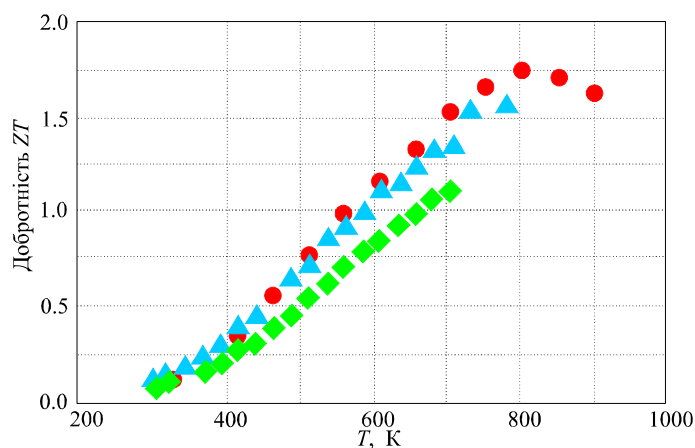


Рис. 12. Ефект підвищення ZT завдяки наноструктурних технологій для системи $PbTe - 4\% Na$.

1. ● – Mg – легований $PbTe - 4\% Na$ спечений;
2. ▲ – Mg – легований $PbTe - 4\% Na$ плавлений;
3. ◆ – $PbTe - 4\% Na$ плавлений.

Було досліджено потрійні органічні-неорганічні гібридні системи, що походять із провідного полімера (Ni – етилететратіонат: $Ni - pett$), ПВХ (полівініл хлорид) і УНТ (вуглецева нанотрубка) і

отримано помітні експериментальні результати ZT 0.28 за 340 К у порівнянні з характеристиками плівки PEDOT-PSS (полі 3, 4 – етілендіоксітіофен-полі стіросульфонат) і плівки PEDDOT-TSS/CNT, як показано на рис. 13 групою Toshiba [7, 8].

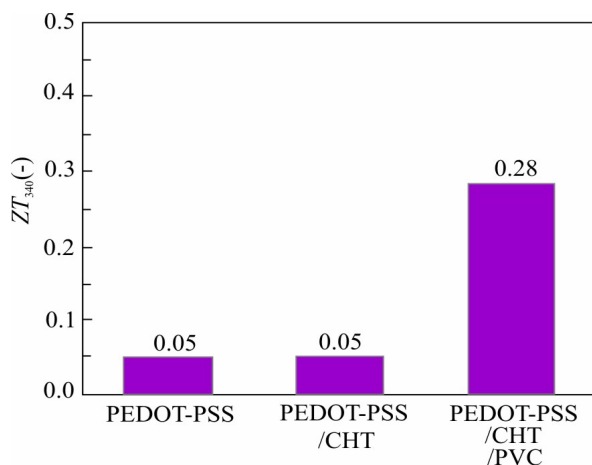


Рис. 13. Ефект поліпшення ZT для потрібної органічної-неорганічної гібридної системи в порівнянні із системами PEDOT-PSS і PEDOT-PSS/CNT.

Можна стверджувати, що новітні експериментальні результати досліджень за різними видами органічних термоелектричних матеріалів, включаючи гібридні системи, будуть досить перспективні в майбутньому.

Екологічно чисті термоелектричні матеріали вважаються дуже важливими для внеску термоелектричних додатків у реальний світ. У Японії здійснюється багато науково-дослідних робіт з термоелектричних матеріалів, що не містять телуру таких, як системи силіцидів, оксидів, сульфідів, включаючи колузіти [9], гейслерові сполуки, у тому числі напівгейслерові, скутерудити, клатрати, і т.д.

Для планомірного впровадження технології термоелектричного генерування електроенергії в практику вона має заздалегідь одержати суспільне визнання. Це значить, що ми повинні дати наочне підтвердження контролю факторів ризику для систем ТЕГЕЕ паралельно з розробкою науки про надійність [10] і техніку безпеки в області ТЕГЕЕ [11]. Необхідно зробити аналіз загроз і включити заходи протидії в систему ТЕГЕЕ ще на етапі демонстраційних випробувань. Для аналізу загроз виділяються три види загроз, обумовлених робочим навантаженням на підсистеми й компоненти, тимчасовою залежністю в процесі експлуатації й взаємозв'язком компонентів трьох основних підсистем: головною системою генерування електроенергії, системою передачі-перетворення енергії й системами джерел і відводу тепла. На практиці, на демонстраційній установці ТЕГЕЕ класу 10 кВт, що використовує відпрацьоване тепло від сталеливарного заводу JFE, і блоках ТЕГЕЕ, установлених на кожній цементній печі заводу з виробництва зубчастих передач Awazu, Komatsu Ltd., встановлено кілька резервних підблоків для захисту в першу чергу головної системи й систем ТТВЕ від серйозних неполадок у роботі. Важливо підкреслити, що системи ТЕГЕЕ з орієнтацією на ринок мають поступово піднятися до суспільного життя.

На закінчення необхідно відзначити, що для утвердження на практиці нової технології, такої як термоелектрика, найважливіше значення має людський фактор. Число членів Термоелектричного товариства Японії з кожним роком зростає й 2015 року становило більше як 500. У країні зберігається високий рівень досліджень і розробок в області термоелектрики. Наприклад, у Міжнародній конференції з органічної і гібридної термоелектрики, що відбулася в Кіото в січні 2016 року, взяло участь близько 150 людей.

Заключні зауваження

З одного боку, у дослідженнях і розробках із покращенням ТЕ характеристик різних систем ТЕ матеріалів спостерігався стійкий прогрес. Щорічно повідомляються значущі експериментальні результати

для ТЕ матеріалів, таких як сульфідів, самозібрані й штучні наноструктурні ТЕ матеріали, і гібридні органічні ТЕ матеріали.

З іншого боку, демонстраційні випробування систем ТЕГЕЕ, що використовують модулі $Bi-Te$, були пов'язані з енергосистемою для підтвердження її надійності для систем класу 500 Вт і систем класу 10 кВт. Вони змогли дати нам перспективу реалізації практичного використання для системи ТТВЕ системи класу понад 100 кВт. Вбудований в ТЕГЕЕ бездротовий сенсорний вузол установлений для етапу практичного застосування як додаток ТЕГЕЕ в області збирання енергії.

Системи ТТВЕ наблизилися до сучасної стадії практичних систем термоелектричних генераторів. На цій стадії будуть надзвичайно необхідні пошуки про надійність, техніку безпеки й різні оцінки. Можна вважати, що в найближчому майбутньому технологія ТЕГЕЕ може стати незамінною базовою технологією для створення високоефективної енергетичної системи у світі.

Подяка

Автори висловлюють сердечну вдячність за сумлінну співпрацю таким дослідникам: д-р Х. Обара (AIST), проф. К. Коумото (Нагойський університет), д-р М. Мікамі (AIST), проф. Х. Нішіно (Нагойський технологічний інститут), п. Н. Учіяма (Atsumitec), д-р Х. Кайбе (KELK), д-р Х. Хачівума (KELK), д-р Т.Канно (Panasonic), проф. І. Хоріта (Токійський технологічний інститут), п. А. Ямамото (AIST), проф. Т. Ііда (Токійський університет), і д-р Т.Накамура (Murata Manufacturing Co., Ltd.).

Література

1. www8.cao.go.jp.
2. www.thermat.jp/.
3. T.Kuroki, K.Kabeya, K.Makino, T.Kajihara, H.Kaibe, H.Hachiuma, H.Matsuno, and A.Fujibayashi, Thermoelectric Generation Using Waste Heat in Steel Works, *J. of Electronic Materials* 43 (6), 2405–2410 (2014).
4. Y.Saito, M.Inomata, T.Oono, T.Kannari, H.Hachiuma, R.Chu, Y.Horita, Solar Powered Desalination Using Thermoelectric Power Generation, *Proc. of the 3rd Joint SQU-JCCP Environment Symposium, Muscat, Oman, 2010*.
5. T.Nakamura, Fabrication of Multi-Layer Type Thermoelectric Modules using Multi-Layer Co-fired Ceramics (MLCC) Process and Application for Energy Harvesting, *Thermoelectric Power Generation System Technology*, 226–242, SST Press, 2013.
6. M.Ohta, Matured but Novel $Pb-Te$ Thermoelectric Material: Marvelous Performance due to the Nano-Structure Technology, *J. of Kinzoku Materials Science & Technology*, 86(3), 213–220(2016).
7. A.Yoshida, N.Toshima, Gold Nanoparticles and Gold Nanorod Embedded PEDOT:PSS Thin Films as Organic Thermoelectric Materials, *J. of Electronic Materials* 43(6), 1492–1497(2014).
8. N.Toshima, Thermoelectric Performance of Organic Materials Including Hybrid Systems, *J. of Kinzoku Materials Science & Technology* 86(3), 221–229 (2016).
9. K.Kim, K.Suekuni, H.Nishiata, M.Ohta, H.Tanaka, and T.Takabatake, High Thermoelectric Performance in Coulsites $Cu_{26-x}Zn_xV_2M_6S_{32}(M=Ge,Sn)$, *Extended Abstract of TSJ 2014*, 27, 2014.
10. K.Nagase, A.Yamamoto, Development of Durability Testing for Thermoelectric Power Generation Module, *J. of Kinzoku Materials Science & Technology*, 86 (3), 230–236 (2016).
11. T.Kajikawa, Present Status on Thermoelectric Power Generation Systems and their Safety, *J. of Japan Society*.

Надійшла до редакції 27.01.2016