

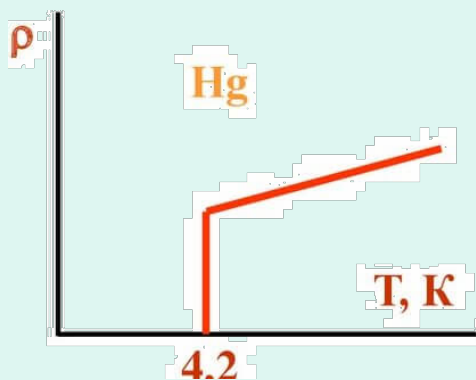
# ВИКОРИСТАННЯ НАДПРОВІДНОСТІ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРИСТРОЯХ



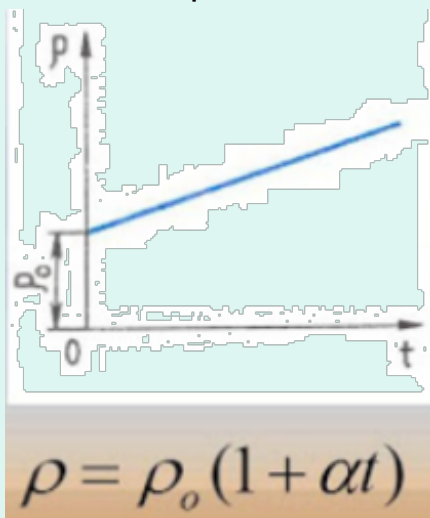
Апарат терапії важкими частинками. У гентрі, що обертається, - надпровідниковий електромагніт Toshiba.

## Явище надпровідності

Надпровідність - властивість деяких матеріалів мати строго нульовий електричний опір при досягненні ними температури нижче певного значення (критична температура).

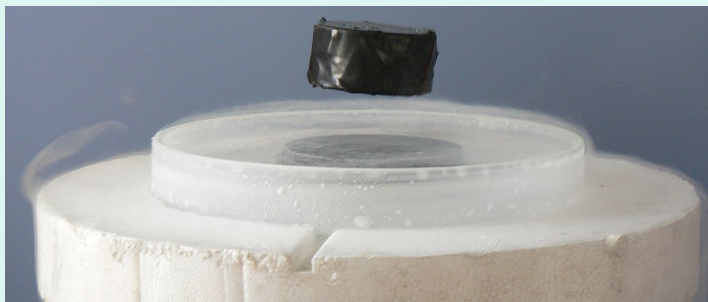


Надпровідник

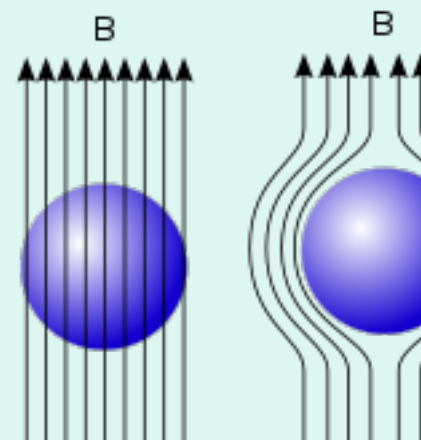


Провідник

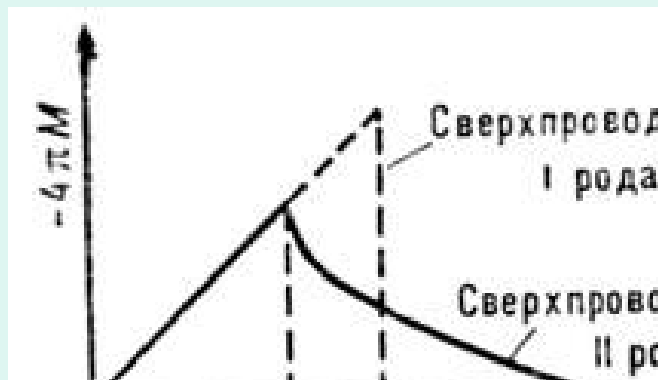
$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$$



Магніт, що левітує над високотемпературним надпровідником, рідким азотом, що охолоджується.

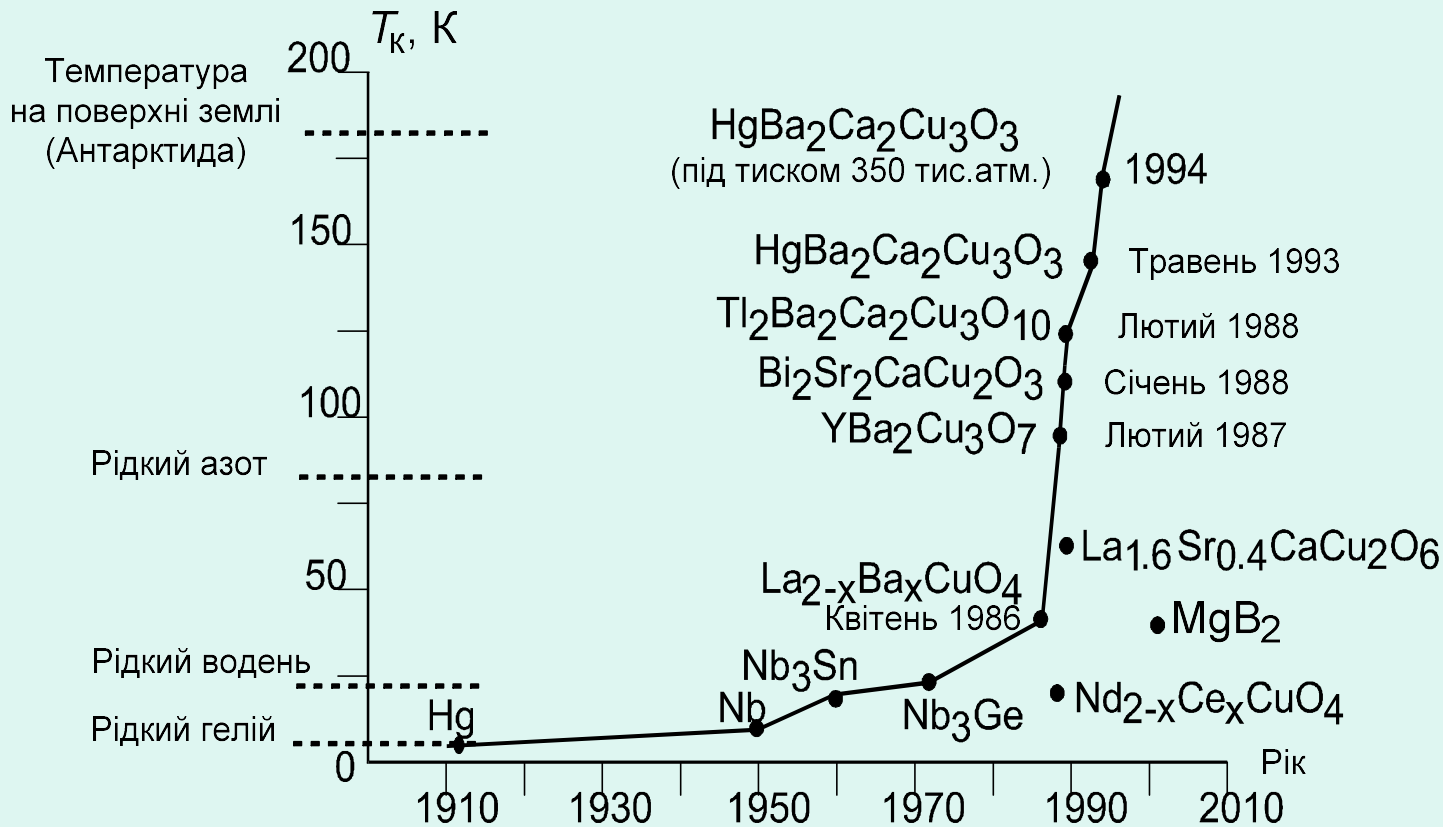


Ефект Мейснера



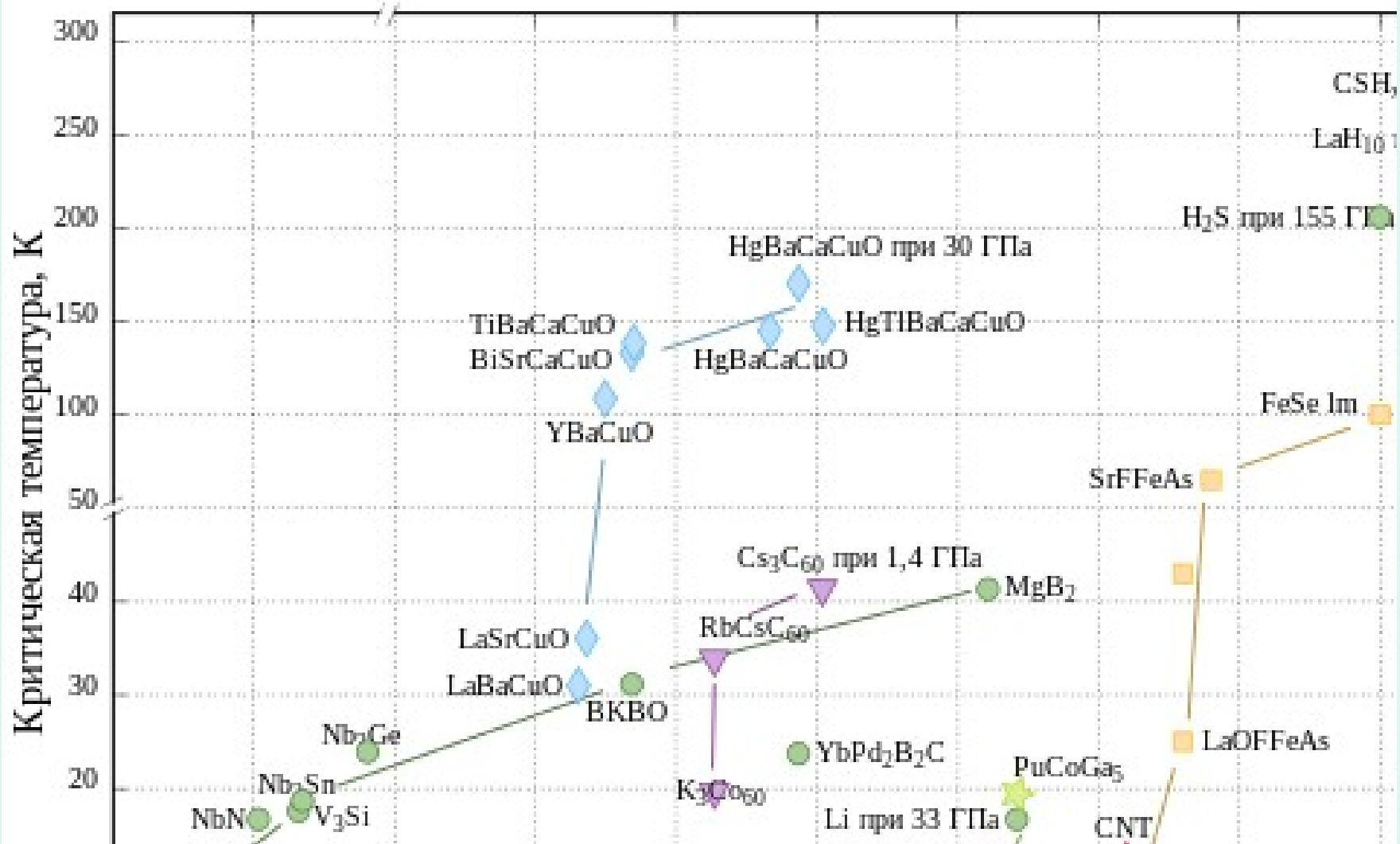
Залежність намагніченості від зовнішнього магнітного поля для надпровідників 1-го та 2-го роду.

# НАДПРОВІДНІ МАТЕРІАЛИ



**НТНП** відносяться чисті метали (наприклад, Hg, Pb, V), сплави (Nb-Ti, Nb-Al) і інтерметалеві сполуки (Nb<sub>3</sub>Sn, Nb<sub>3</sub>Ge), які стійко працюють лише при температурі близькій до температури рідкого гелію – 4,2 К.

**ВТНП** - керамічні сполуки, здатні працювати при температурі рідкого водню (LaBaCuO, LaSrCaCuO) або азоту (YBaCuO, BiSrCaCuO, TlBaCaCuO, HgBaCaCuO)

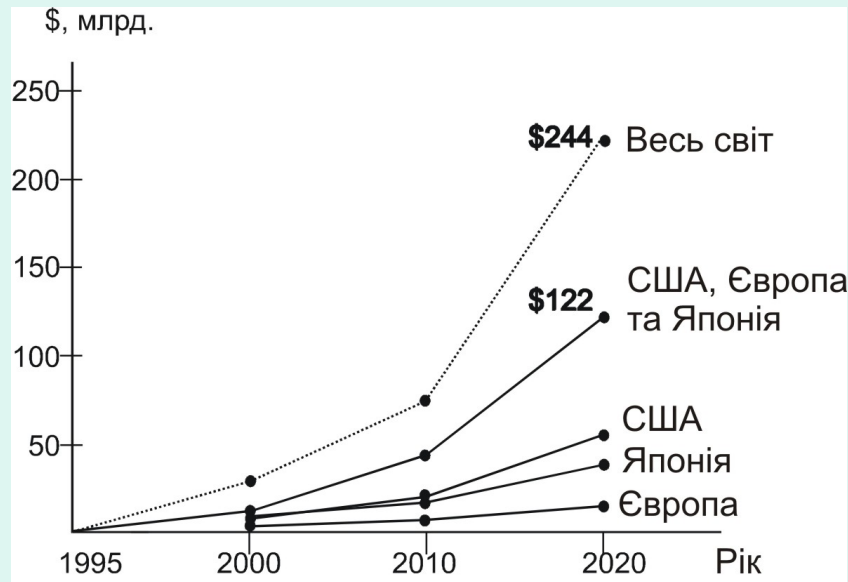


До 2020 найбільш високотемпературними надпровідниками при атмосферному тиску є купрати - кераміки (змішані оксиди)

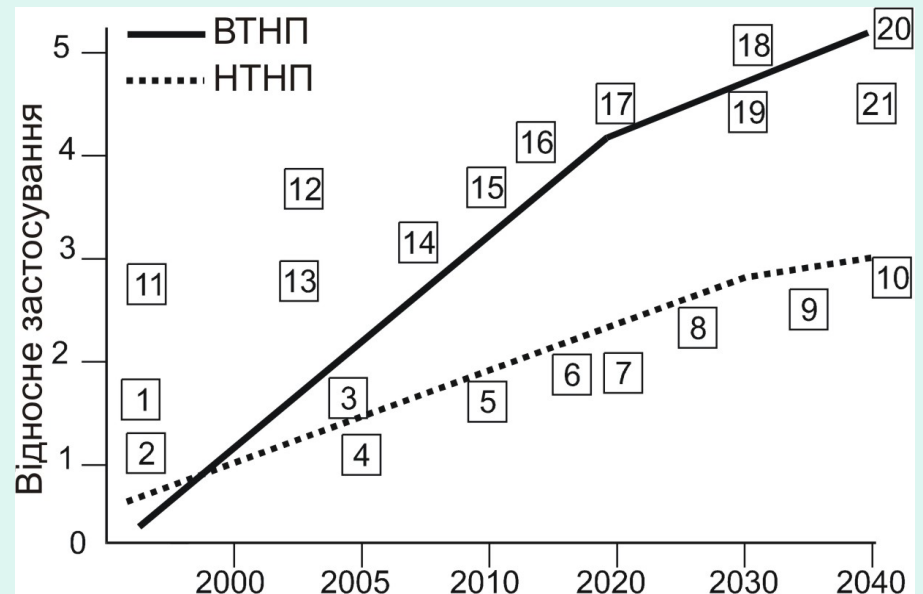
## **Широкому практичному використанню явища надпровідності в електромеханіці перешкоджають наступні фактори:**

- ✓ *надпровідники зберігають свої чудові властивості тільки при криогенних температурах;*
- ✓ *існування критичних величин щільності струму і магнітного поля, при перевищенні яких відбувається перехід у нормальний стан з появою високого опору;*
- ✓ *надпровідні проводи дорогі, вони складаються з особливих матеріалів і являють собою складну конструкцію;*
- ✓ *необхідне застосування спеціальних криогенних зріджувачів і холодоагентів, кріостатів і іншого допоміжного устаткування для функціонування надпровідникових елементів пристрою;*
- ✓ *відбувається постійний розвиток і удосконалювання електромеханічних пристроїв, що використовують традиційні провідникові матеріали, які є альтернативою надпровідникової технології;*
- ✓ *існують значні технологічні, технічні і фінансові проблеми, пов'язані з використанням надпровідників.*

## Ринок надпровідникового електротехнічного устаткування

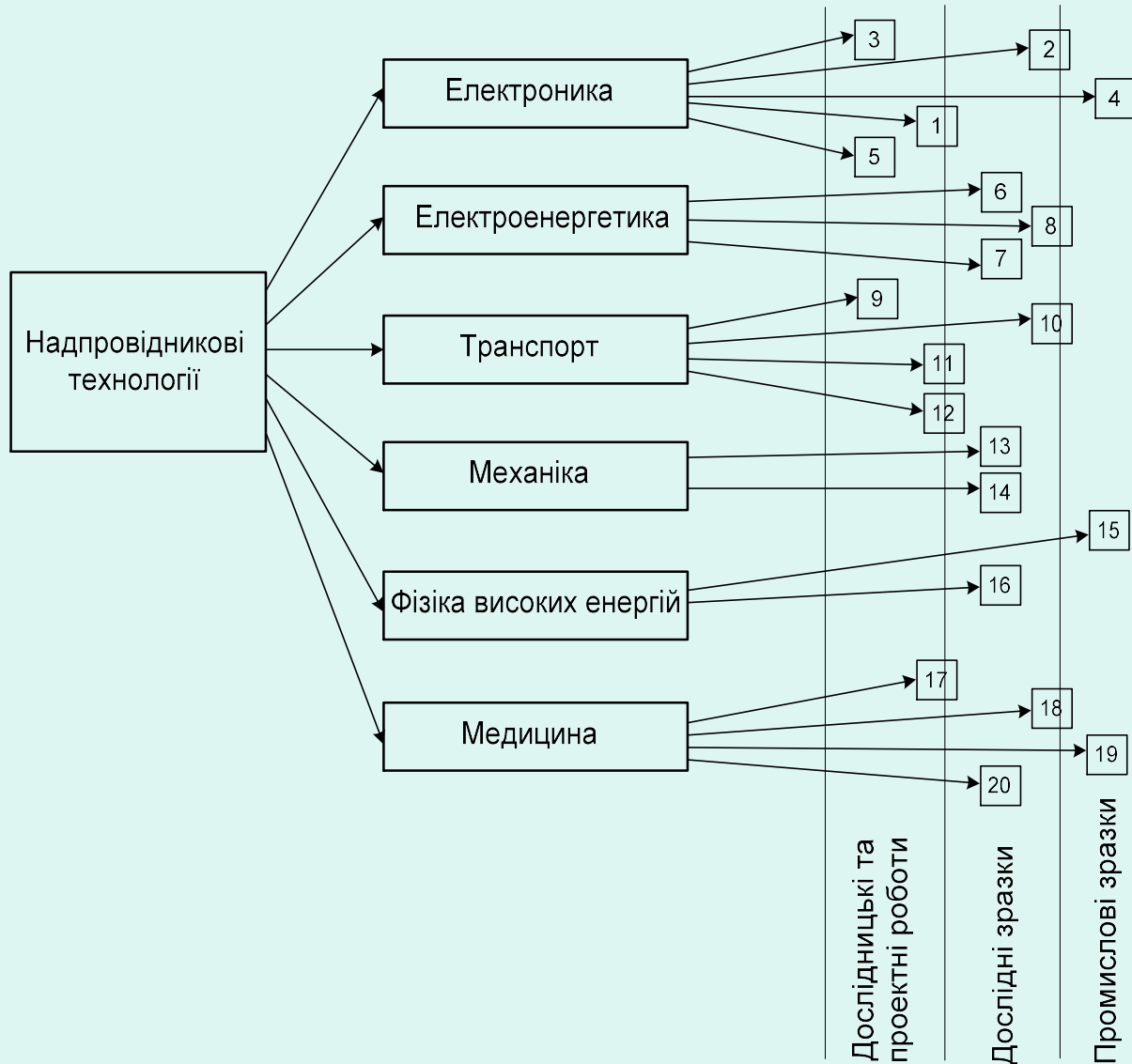


## Реалізовані і прогнозовані застосування НТНП і ВТНП



1 – контроль технологічних процесів; мікронакопичувачі енергії; 2 – прилади на основі сквідів, магніти для прискорювачів, магнітні томографи; 3 – обробка аналогових сигналів; 4 – обробка цифрових сигналів, обмежники струму КЗ; 5 – **транспорт на магнітній подушці, електричні двигуни для кораблів**; 6 – великі накопичувачі енергії; 7 – генератори мегавольтамперного рівня, електродвигуни мегаватного рівня; 8 – електромагнітні двигуни для кораблів; 9 – трансформатори (1 ГВА); 10 – термоядерні реактори; 11 – магнітні екрани; 12 – СВЧ-прилади, проводи; 13 – магнітні підшипники; 14 – обробка аналогових сигналів, проводи, силові кабелі; двигуни; 15 – обмежники струму КЗ, регулятори технологічних процесів, накопичувачі енергії; 16 – мікронакопичувачі енергії, обробка цифрових сигналів, кабелі (2 ГВА); 17 – транспорт на магнітній подушці, двигуни мегаватного рівня; 18 – генератори мегавольтамперного рівня; 19 – електромагнітні двигуни для кораблів; 20 – термоядерні реактори, накопичувачі енергії (100 кВт·годин); 21 – трансформатори гігавольтамперного рівня, кабелі (5 ГВА).

# Стан і області застосування надпровідності



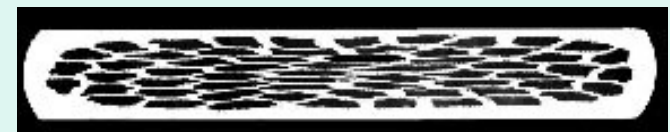
- 1 – струмоводи;
- 2 – надпровідникові електронні прилади;
- 3 – обчислювальна техніка на надпровідникових елементах;
- 4 – сквіди;
- 5 – стільниковий і супутниковий зв'язок;
- 6 – генератори;**
- 7 – накопичувачі електричної енергії;
- 8 – силові кабелі;**
- 9 – космічні станції;
- 10 – транспорт на магнітній подушці;
- 11 – піднімальні пристрої;
- 12 – судові електродвигуни;
- 13 – електродвигуни загального призначення;**
- 14 – магнітні підшипники;
- 15 – прискорювачі;
- 16 – синхротрони;
- 17 – магнітоенцефалографи;
- 18 – магнітні екрани;
- 19 – ЯМР-томографи;
- 20 – магнітокардіографи

### До основних НТНП проводів відносяться:

- деформуємий сплав Nb-Ti з такими критичними параметрами: температура  $T_k = 9,6$  К при індукції магнітного поля  $B = 0$  (вартість проводу не перевищує декількох доларів за 1 кА·м);
- крихка інтерметалева сполука Nb<sub>3</sub>Sn із критичною температурою  $T_k = 18,3$  К при  $B = 0$  (вартість цього проводу становить приблизно 10 доларів за 1 кА·м).

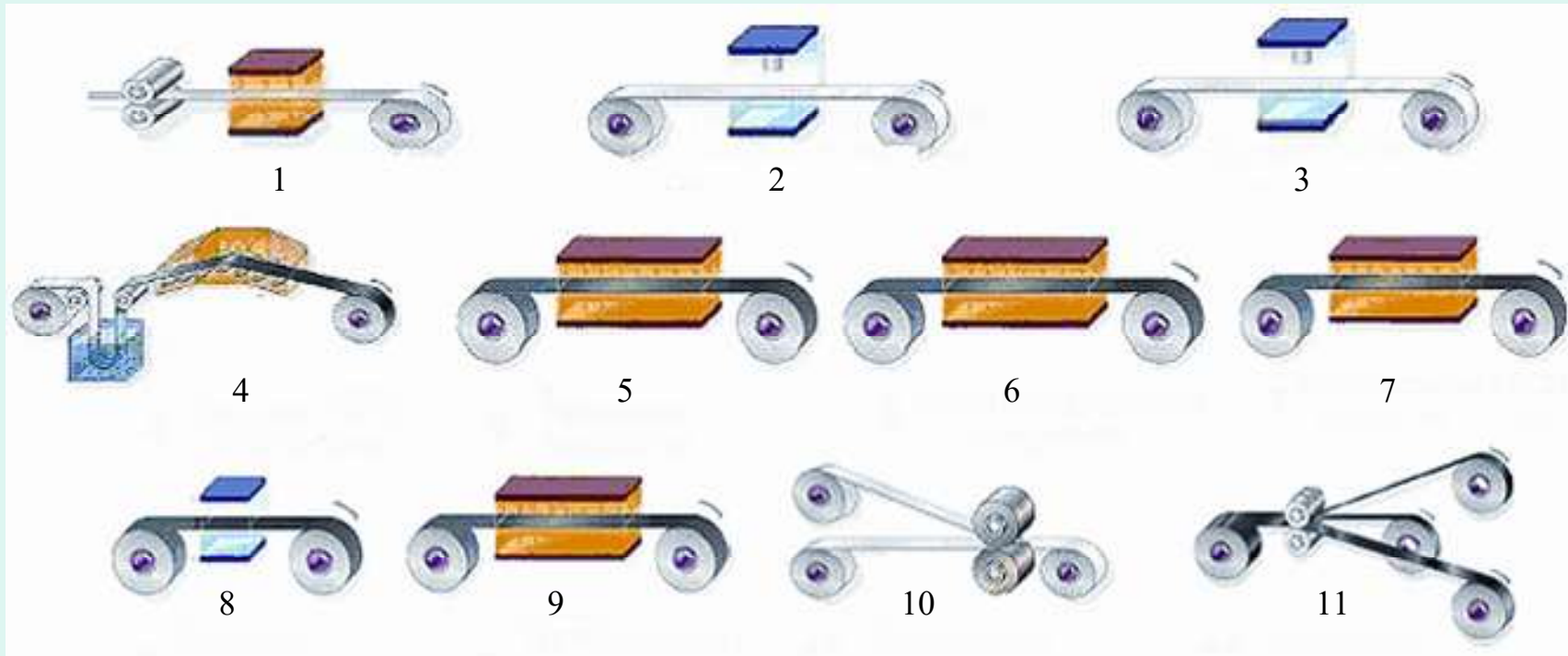
Стрічкові ВТНП проводи виготовляються на основі таких матеріалів:

- **сполука Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>x</sub>** у срібній оболонці (Bi-2212/Ag); її критична температура  $T_k \approx 90$  К, критичне поле і струми перевищують аналогічні показники НТНП проводів;
- **сполука Bi-2223/Ag** має  $T_k = 107$  К;  $j_k = 100$  А/мм<sup>2</sup> при  $T = 77,3$  К і  $B = 1$  Тл. Вартість цього матеріалу становить близько 100 доларів за 1 кА·м. Найближчим часом очікується зниження його ціни до 10...15 доларів за 1 кА·м, що зробить його конкурентноздатним на ринку надпровідних матеріалів.



Стрічка Bi-2223/Ag

# Технологічні етапи отримання ВТНП проводів 2-го покоління

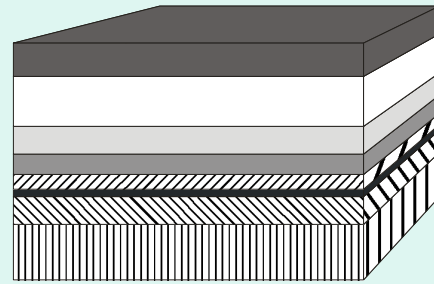


- 1 – виготовлення стрічки – підложки;
- 2 – наноструктурування поверхні підложки;
- 3 – осадження буферного шару;
- 4 – покриття прекурсором YBCO;
- 5 – розкладення прекурсору;
- 6 – наноструктурування поверхні;
- 7 – формування надпровідного покриття YBCO;
- 8 – осадження срібла;
- 9 – термообробка у окислювальному середовищі;
- 10 – вирівнювання стрічки;
- 11 – розрізання стрічки по довжині

# Структура плівкових проводів 2-го покоління виробництва LANL і ORNL

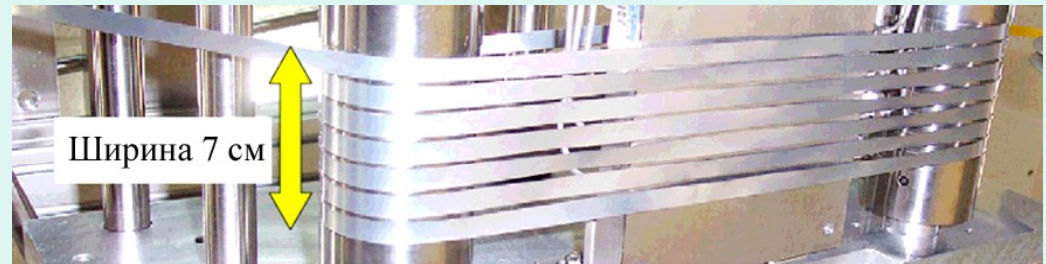
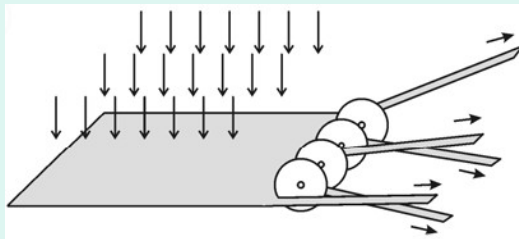
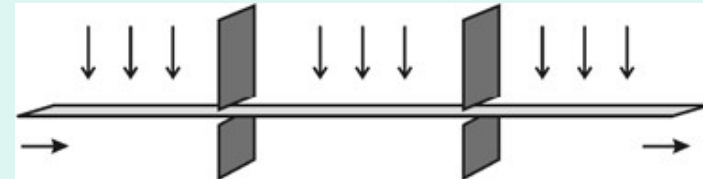
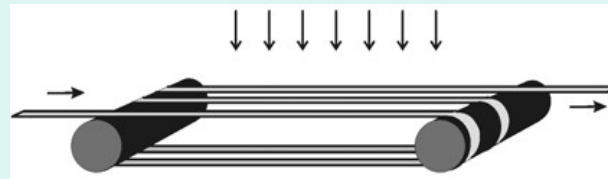
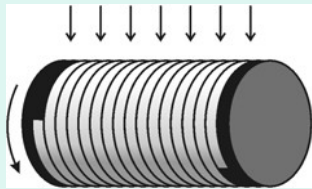
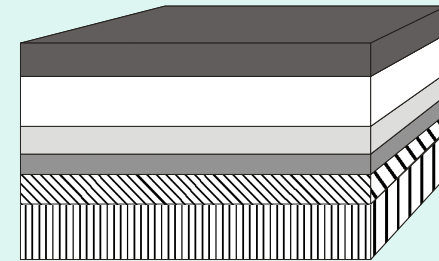
## LANL, SuperPower

Шунт  
 ВТНП  
 30 нм SrTiO<sub>3</sub>  
 20...30 нм MgO  
 10 нм IBAD MgO  
 7 нм Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
 80 нм Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
 Хастелой С-276



## ORNL, AMSC

Шунт (Ag)  
 ВТНП  
 75 нм CeO<sub>2</sub>  
 75 нм YSZ  
 75 нм Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
 Ni-5%W

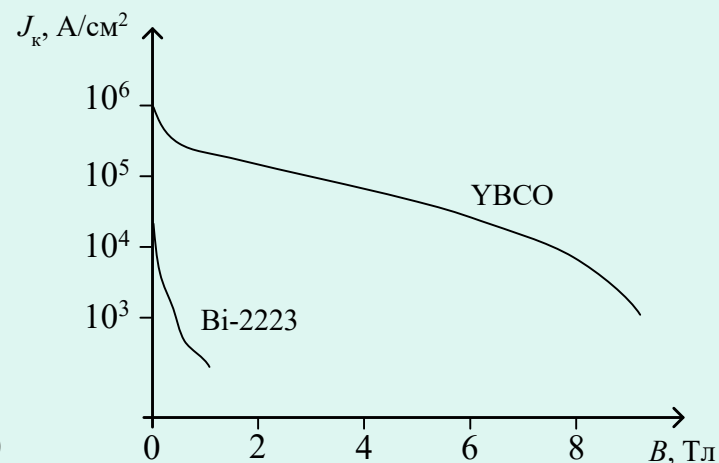
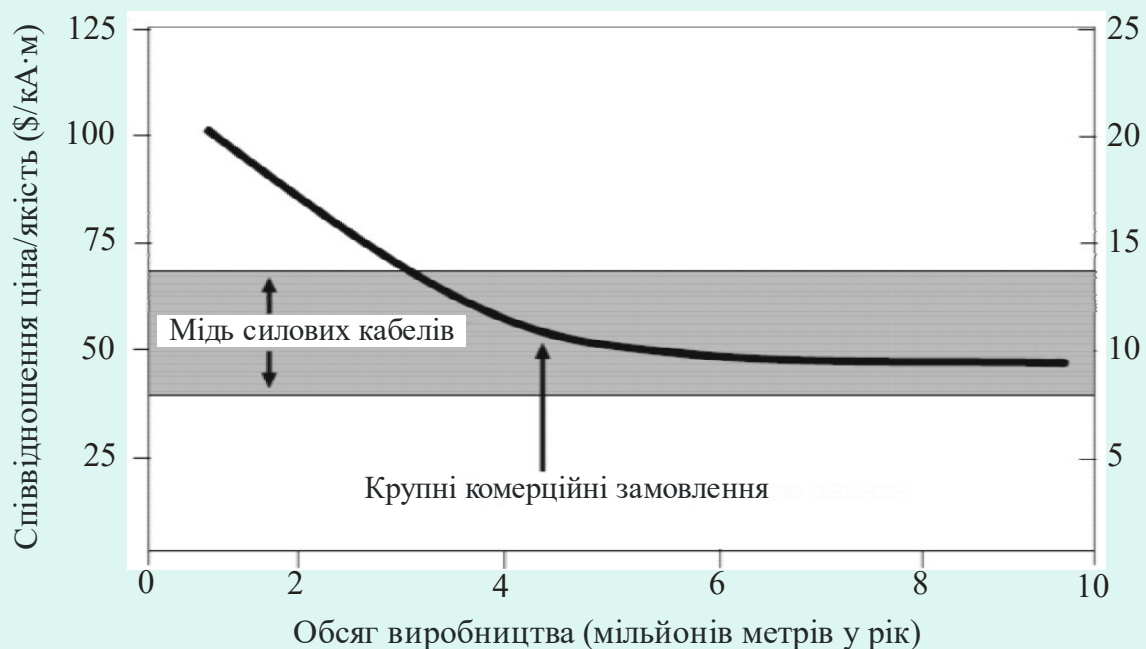


Розрізання стрічки  
 на заводі SuperPower

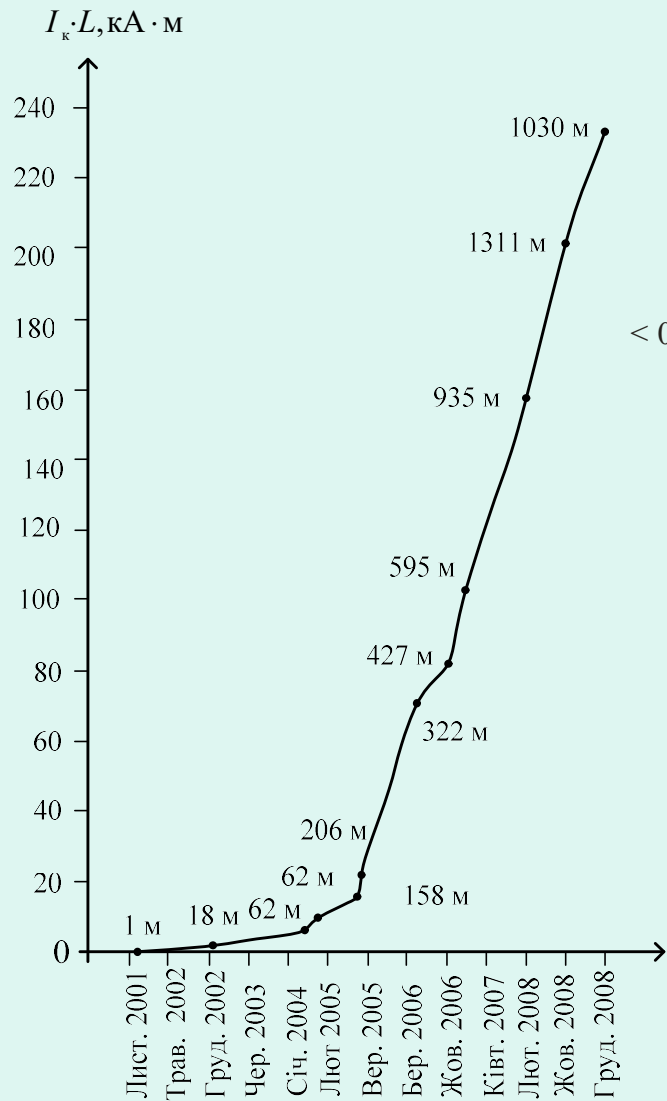
Розташування стрічки для багаторазового  
 проходження крізь реактор (SuperPower, США)

# ВТНП обмотувальні матеріали 2-го покоління

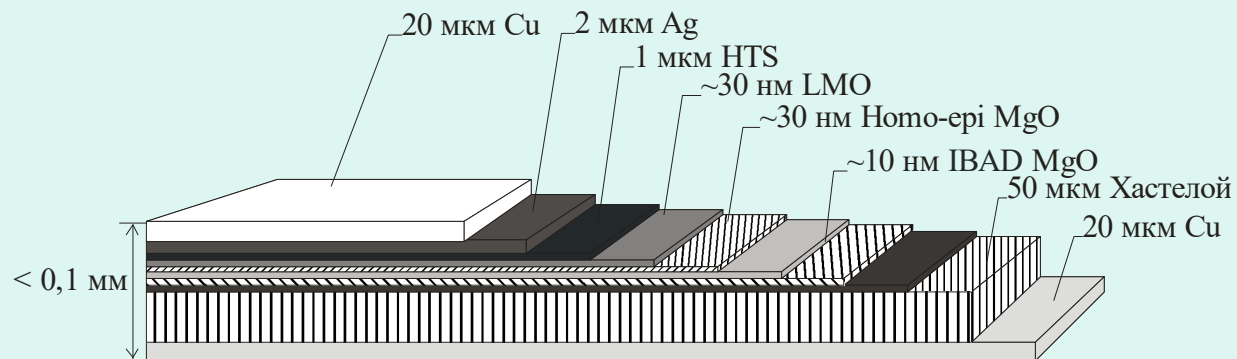
Прогноз зниження вартості ВТНП проводів 2-го покоління і початку їхнього інтенсивного комерційного використання (за даними компанії AMSC для умовного проводу „344” зі струмом 200 А)



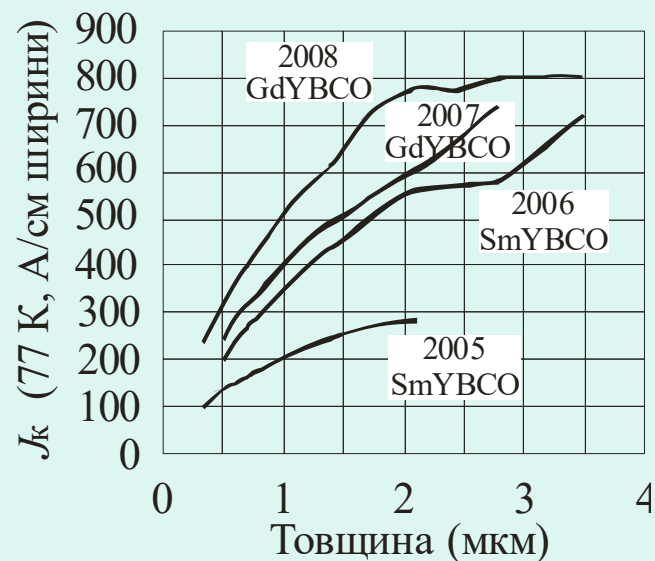
Порівняння залежності щільності критичного струму від магнітного поля для ВТНП проводів 1-го покоління (Bi-2223 у срібній трубці) і 2-го покоління (біаксально-текстурованого YBCO на стрічці зі сплаву Хастелой з осадженим буферним шаром товщиною 1 мкм зі стабілізованого ітрієм окису цирконію (YSZ))



Поліпшення характеристик  
проводу 2-го покоління *SuperPower*  
(з листопаду 2001 р. по кінець 2008 р.)

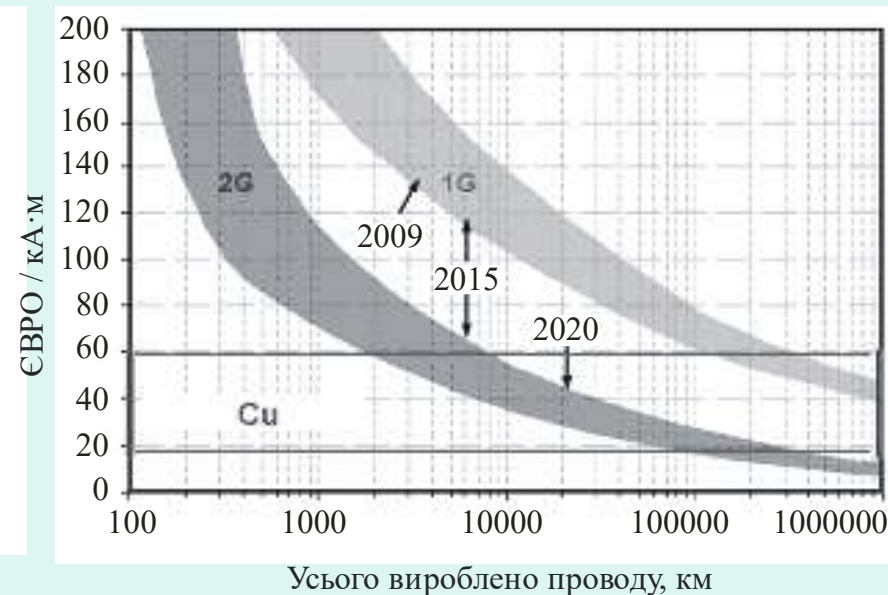
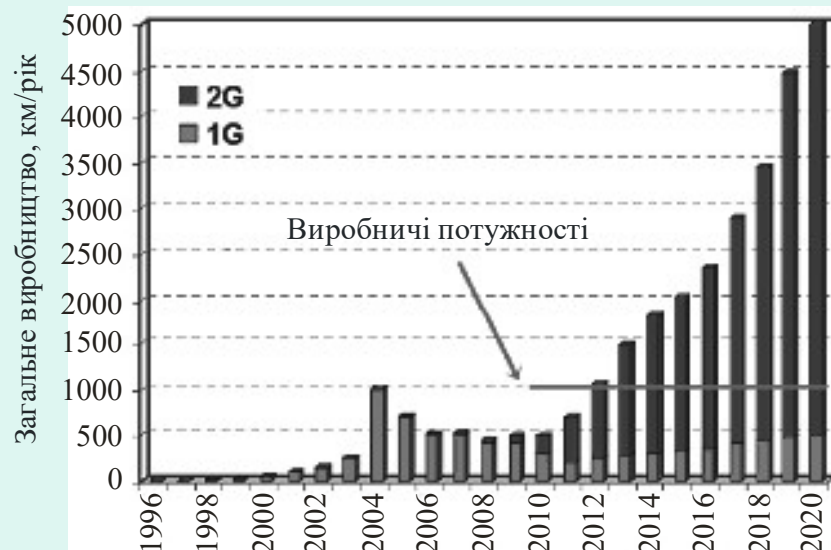


Структура ВТНП проводу виробництва *SuperPower*



Прогрес  
у підвищенні характеристик товстих  
плівок RBCO *SuperPower*

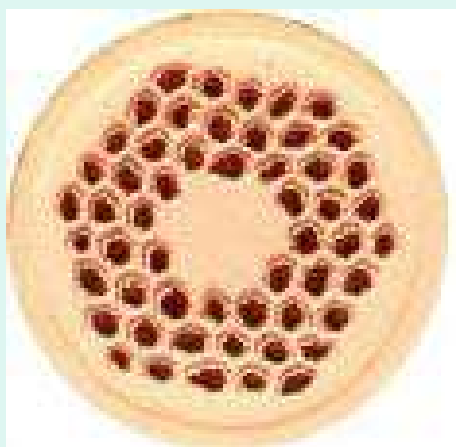
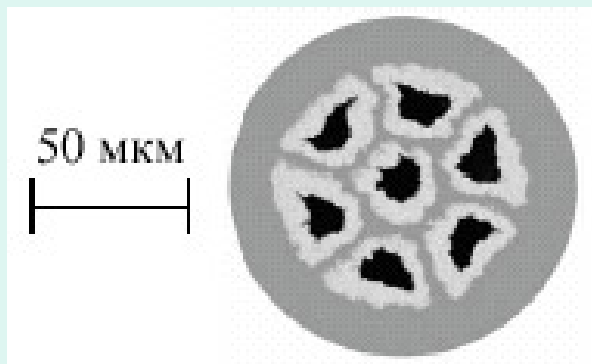
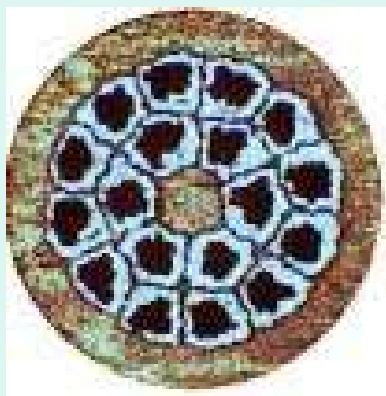
## Прогноз розвитку об'єму виробництва і вартості ВТНП проводу



Технологія ВТНП шару	<i>MOCVD</i>	<i>MOD</i>	<i>PLD</i>	<i>PLD*</i>
Підложка	Хастелой	Ni-W ( <i>RABiTS</i> )	Нерж. сталь	Хастелой
Максимальна довжина куска $L_{max}$ , м	1311	130	510	10
$I_k$ , А/см	153	300	403	150
$L_{max} \cdot I_k$ (кА·м)	201	39	206	2
Виконавці	<i>SuperPower,</i> <i>ISTEC</i>	<i>AMSC</i>	<i>Fujikura, Bruker, I</i> <i>STEC, Sumitomo</i>	<i>Theva,</i> <i>KERI</i>

Поперечний переріз багатожилевих діборідмагнієвих проводів різних типів, виготовлених *Hyper Tech* з використанням Nb хімічного бар'єру у мідній матриці:

- а) 19 жил, діаметр 0,834 мм;    б) 7 жил, діаметр 0,834 мм;  
в) 61 жила, діаметр 1,01 мм;    г) прямокутного перетину



Стрічки виробництва *Columbus Superconductors Spa*



## Проекти компанії *Hyper Tech*

<b>Проект</b>	<b>Замовник</b>
<b>Магніт для ЯМР томографії</b>	<b>Національний інститут здоров'я (NIH)</b>
<b>Трансформатор та індуктор для живлення корабельного двигуна</b>	<b>ВМС США</b>
<b>Котушки для електродвигуна та генератора</b>	<b>NASA</b>
<b>Статор</b>	<b>NASA</b>
<b>Рефрижератор на принципі адіабатичного розмагнічування</b>	<b>NASA</b>
<b>Магніти для прискорювачів</b>	<b>Міністерство Енергетики (DOE)</b>
<b>Струмообмежувачі</b>	<b>Cambridge Univ., Rolls Royce plc (Великобританія)</b>